



**TUGAS AKHIR - MN 141581**

# **ANALISA KEKUATAN SEKAT BERGELOMBANG KAPAL TANKER MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**Zaki Rabbani  
NRP 4113100060**

**Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D  
Septia Hardy Sujatanti, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017**





---

**TUGAS AKHIR - MN 141581**

**ANALISA KEKUATAN SEKAT BERGELOMBANG KAPAL  
TANKER MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**Zaki Rabbani  
NRP 4113100060**

**Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D  
Septia Hardy Sujatanti, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017**



**FINAL PROJECT - MN 141581**

## **STRENGTH ANALYSIS OF TANKER CORRUGATED BULKHEAD USING FINITE ELEMENT METHOD**

**Zaki Rabbani  
NRP 4113100060**

**Supervisors  
Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D  
Septia Hardy Sujiatanti, S.T., M.T.**

**DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE  
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2017**

## LEMBAR PENGESAHAN

# ANALISA KEKUATAN SEKAT BERGELOMBANG KAPAL TANKER MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

## TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Keahlian Rekayasa Perkapalan – Konstruksi dan Kekuatan Kapal  
Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

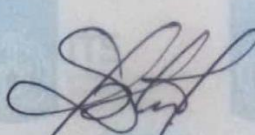
Oleh:

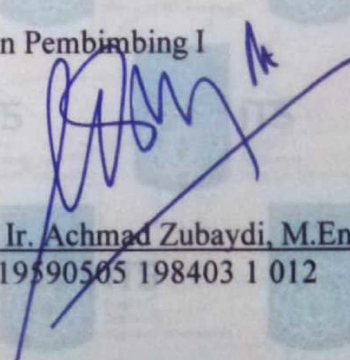
**ZAKI RABBANI**  
NRP 4113100060

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:


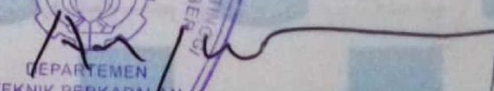
Dosen Pembimbing II

Dosen Pembimbing I

  
Septia Hardy Sujiatanti, S.T., M.T.  
NIP 19840921 201212 2 001

  
Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D.  
NIP 19590505 198403 1 012

Mengetahui,  
Kepala Departemen Teknik Perkapalan

  
  
Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc., Ph.D.  
NIP 19640210 198903 1 001

SURABAYA, 20 JULI 2017



## LEMBAR REVISI

# ANALISA KEKUATAN SEKAT BERGELOMBANG KAPAL TANKER MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

### TUGAS AKHIR

Telah direvisi sesuai dengan hasil Ujian Tugas Akhir  
Tanggal 06 Juli 2017

Bidang Keahlian Rekayasa Perkapalan – Konstruksi dan Kekuatan Kapal  
Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**ZAKI RABBANI**  
NRP 4113100060

Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tugas Akhir:

1. Sri Rejeki Wahyu Pribadi, S.T., M.T.
2. Totok Yulianto, S.T., M.T.
3. Wing Hendroprasetyo A.P., S.T., M.Sc.

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

1. Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D.
2. Septia Hardy Sujiantanti, S.T., M.T.

SURABAYA, 20 JULI 2017

Dipersembahkan untuk  
Orang tua saya atas segala dukungan dan doanya

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas karunianya Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.

Pada kesempatan ini Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam pengerjaan sampai penyelesaian Tugas Akhir ini, yaitu:

1. Ir. Utami selaku ibu terbaik yang terus memberikan dukungan dan doa serta masukan agar Tugas Akhir ini dapat terselesaikan;
2. Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D., dan Septia Hardy Sujianti, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan, ilmu, nasihat, dan motivasi yang telah diberikan selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini;
3. Totok Yulianto, S.T., M.T., dan Hasanudin, S.T., M.T. selaku Kepala Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan Kapal dan Laboratorium Desain Kapal Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS atas bantuannya selama pengerjaan Tugas Akhir ini dan atas izin pemakaian fasilitas laboratorium;
4. Shakina Azizul Haque selaku sahabat terdekat dan teman seperjuangan yang telah senantiasa tanpa lelah dengan terus menerus memberi dukungan baik dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini maupun dalam proses perkuliahan;
5. Fajar Hamonangan S. yang telah dengan baik hati memberikan fasilitas sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan;
6. Dedi Dwi Sanjaya dan Ardianus selaku teman seperjuangan yang dengan senantiasa memberikan dukungan dan bantuan dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini;
7. Mayangkara Pasha Mahadika dan Ridho Rizky Nugraha selaku teman yang selalu memberikan dukungan dan bantuan dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini;
8. Kybe, Yuda, Genta, Anggah, Oka, Richa, Kidhung, Sandra, dan teman-teman Giung lainnya yang telah memberi bantuan dan dukungan selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini;
9. Teman-teman Submarine, Forecastle, Deadrise, Samudera Raksa serta pihak-pihak lain yang telah membantu dan mendukung dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan sehingga kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan. Akhir kata semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, 13 Juli 2017

Zaki Rabbani



# ANALISA KEKUATAN SEKAT BERGELOMBANG KAPAL TANKER MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama Mahasiswa : Zaki Rabbani  
NRP : 4113100060  
Departemen / Fakultas : Teknik Perkapalan / Teknologi Kelautan  
Dosen Pembimbing : 1. Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D.  
2. Septia Hardy Sujiatanti, S.T., M.T.

## ABSTRAK

Pemasangan sekat bergelombang dalam tangki muat kapal tanker memiliki keuntungan dalam hal pembersihan tangki dan penambahan kapasitas tangki muat. Dalam perkembangan penggunaan sekat bergelombang pada kapal tanker, tangki muat dengan ketinggian lebih dari 16 m perlu dilakukan pemasangan konstruksi tambahan berupa *lower stool* dan diafragma sekat yang dapat mengurangi volume dan mengganggu proses pembersihan tangki muat.

Dalam Tugas Akhir ini akan dilakukan analisis kekuatan sekat bergelombang dengan konstruksi tambahan berupa *lower stool* dan diafragma sekat untuk mendapatkan desain yang optimum. Data sekat bergelombang diambil dari data konstruksi tangki muat kapal tanker 17500 LTDW dengan ukuran ketinggian *lower stool* dan ketebalan diafragma sekat terpasang berurutan sebesar 1280 mm dan 14 mm. Dari data tersebut ditentukan variasi tinggi *lower stool* sebesar 895 mm, 1280 mm, dan 1790 mm; dan variasi tebal diafragma sekat sebesar 11 mm, 13 mm, dan 14 mm. Proses analisis dilakukan menggunakan model konstruksi sekat bergelombang yang dianalisis menggunakan metode elemen hingga. Dari proses analisis didapatkan nilai tegangan, deformasi, berat, dan volume konstruksi sekat bergelombang.

Nilai tegangan terkecil terjadi pada tinggi *lower stool* 1790 mm, sedangkan ketebalan diafragma sekat tidak berpengaruh pada nilai tegangan. Nilai deformasi terkecil terjadi pada tinggi *lower stool* 1790 mm, dan tebal diafragma sekat 14 mm. Konstruksi yang memiliki berat paling rendah memiliki ukuran tinggi *lower stool* 895 mm, dan tebal diafragma 11 mm. Volume tangki muat mengalami pengurangan terkecil pada konstruksi sekat bergelombang dengan ukuran tinggi *lower stool* 895 mm, dan tebal diafragma sekat 11 mm. Pada perhitungan tegangan, konstruksi sekat dengan tinggi *lower stool* 895 mm tidak memenuhi kriteria sehingga ukuran *lower stool* yang optimum adalah 1280 mm dengan tebal diafragma sekat 11 mm. Kontruksi tersebut memiliki nilai tegangan maksimum sebesar 278 MPa, nilai deformasi maksimum sebesar 8.283 mm, berat konstruksi 59.167 ton, dan volume konstruksi sebesar 79.548 m<sup>3</sup>.

Kata kunci: sekat bergelombang, *lower stool*, metode elemen hingga, analisis kekuatan

# **STRENGTH ANALYSIS OF TANKER CORRUGATED BULKHEAD USING FINITE ELEMENT METHOD**

Author : Zaki Rabbani  
ID No. : 4113100060  
Dept. / Faculty : Naval Architecture / Marine Technology  
Supervisors : 1. Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D.  
2. Septia Hardy Sujatanti, S.T., M.T.

## **ABSTRACT**

Installation of corrugated bulkhead in cargo tank has its own advantages in the means of tank cleaning process and increasing cargo tank. Corrugated bulkhead which is fitted in large cargo tank with the height of tank is more than 16 m, must be fitted with additional structures such as lower stool and bulkhead diaphragm. However, when those structures is fitted, the tank cargo capacity is reduced and they can be obstacles to tank cleaning process.

This Final Project will carry strength analysis for corrugated bulkhead with additional structure, such as lower stool and bulkhead diaphragm, to get the optimum design of those structures. Dimensional data of corrugated bulkhead obtained from technical data of 17500 LTDW oil tanker, where lower stool and bulkhead diaphragm are fitted on corrugated bulkhead with the height and thickness of 1280 mm and 14 mm. The existing dimensional data will be the base for determining the dimension of variations which will be analysed in this Final Project. The variations consist of three different heights of lower stool with three different thicknesses of bulkhead diaphragm; lower stool heights are 895 mm, 1280 mm, and 1790mm; and bulkhead diaphragm thicknesses are 14 mm, 13 mm, and 11mm. Strength analysis will be carried with corrugated bulkhead structural model and calculated using finite element methods. The value of stress, deformation, weight, and costruction volume will be obtained in the analysis process.

Minimum stress value found on the highest variaton of lower stool height, while variation of diaphragm thickness do not affect the stress value. Deformation with minimum value found on the highest lower stool; 1790 mm; and the thickest bulkhead diaphragm; 14 mm. While the value of construction weight and volume will be reach the minimum value on the lowest variation of lower stool; 895 mm; and the thinnest bulkhead diaphragm; 11 mm. However, from the calculation of yield utilisation factor criteria for the lowest variation of lower stool does not meet the requirement, so the optimum dimension of lower stool will be at the hieght of 1280 mm with the thickness of bulkhead diaphragm is 11 mm. This variation have the value of maximum stress 278 MPa, maximum deformation 8.283 mm, construction weight 59.167 ton, dan construction volume 79.548 m<sup>3</sup>.

Keywords: corrugated bulkhead, lower stool, finite element method, strength analysis

# DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
LEMBAR REVISI.....	iv
HALAMAN PERUNTUKAN.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiii
Bab I PENDAHULUAN .....	1
I.1. Latar Belakang Masalah .....	1
I.2. Perumusan Masalah.....	2
I.3. Tujuan.....	2
I.4. Batasan Masalah.....	2
I.5. Manfaat.....	3
I.6. Hipotesis.....	3
Bab II STUDI LITERATUR .....	5
II.1. Sekat Bergelombang .....	5
II.1.1. Elemen Sekat Bergelombang.....	6
II.1.2. Kekuatan Sekat Bergelombang .....	7
II.2. Konstruksi Lower Stool .....	8
II.3. Konstruksi Diafragma Sekat Bergelombang.....	10
II.4. Beban Lokal Statis Muatan .....	11
II.5. Metode Elemen Hingga.....	12
II.6. Analisis Elemen Hingga Dibantu Komputer.....	16
II.7. Tegangan Von Mises.....	17
II.8. Model Sekat Bergelombang .....	17
II.8.1. Material Konstruksi Sekat Bergelombang.....	18
II.8.2. Local Fine Mesh Zone .....	19
II.9. Konvergensi .....	20
II.10. Tegangan Ijin Maksimum Model .....	21
Bab III METODOLOGI .....	23
III.1. Studi Literatur .....	23
III.2. Pengumpulan Data .....	23
III.2.1. Ukuran Utama Kapal .....	23
III.2.2. Rencana Umum.....	24
III.2.3. Blok Kapal .....	25
III.2.4. Penampang Melintang Sekat Bergelombang .....	28
III.3. Penentuan Variasi.....	29
III.4. Pemodelan Sekat Bergelombang.....	31
III.4.1. Tahap Pre-processor .....	32
III.4.2. Tahap Solver .....	40
III.4.3. Tahap Post-processor .....	41

III.5.	Konvergensi Model Sekat Bergelombang .....	41
III.5.1.	Konvergensi Model 1 .....	42
III.5.2.	Konvergensi Model 2 .....	43
III.5.3.	Konvergensi Model 3 .....	45
III.6.	Penentuan Kondisi Batas Model .....	46
III.7.	Perhitungan Berat Konstruksi Model Sekat Bergelombang .....	48
III.8.	Perhitungan Volume Tangki Muat .....	49
III.9.	Bagan Alir .....	50
Bab IV	PEMBAHASAN .....	53
IV.1.	Hasil Simulasi Model 1 .....	53
IV.1.1.	Model 1A .....	53
IV.1.2.	Model 1B .....	54
IV.1.3.	Model 1C .....	56
IV.1.4.	Perbandingan Hasil Simulasi Pada Variasi Tebal Diafragma Sekat Model 1 .....	58
IV.2.	Hasil Simulasi Model 2 .....	60
IV.2.1.	Model 2A .....	60
IV.2.2.	Model 2B .....	62
IV.2.3.	Model 2C .....	63
IV.2.4.	Perbandingan Hasil Simulasi Pada Variasi Tebal Diafragma Sekat Model 2 .....	65
IV.3.	Hasil Simulasi Model 3 .....	67
IV.3.1.	Model 3A .....	67
IV.3.2.	Model 3B .....	69
IV.3.3.	Model 3C .....	70
IV.3.4.	Perbandingan Hasil Simulasi Pada Variasi Tebal Diafragma Sekat Model 3 .....	72
IV.4.	Perbandingan Tegangan Pada Variasi Tinggi Lower Stool .....	74
IV.5.	Perhitungan Yield Utilisation Factor Model Sekat Bergelombang .....	76
IV.6.	Perbandingan Deformasi Pada Variasi Tinggi Lower Stool Model .....	77
IV.7.	Perbandingan Berat Konstruksi Model .....	79
IV.7.1.	Model Dengan Variasi Tinggi Lower Stool .....	80
IV.7.2.	Model Dengan Variasi Tebal Diafragma Sekat .....	80
IV.8.	Perbandingan Pengurangan Volume Tangki Muat .....	82
IV.8.1.	Model Dengan Variasi Tinggi Lower Stool .....	83
IV.8.2.	Model Dengan Variasi Tebal Diafragma .....	83
IV.9.	Pemilihan Model Yang Optimum .....	85
IV.9.1.	Variasi Tinggi Lower Stool .....	87
IV.9.2.	Variasi Tebal Diafragma Sekat .....	87
Bab V	KESIMPULAN DAN SARAN .....	89
V.1.	Kesimpulan .....	89
V.2.	Saran .....	90
DAFTAR PUSTAKA	.....	91
LAMPIRAN A	PERHITUNGAN BEBAN LOKAL STATIS MUATAN	
LAMPIRAN B	HASIL SIMULASI KONVERGENSI	
LAMPIRAN C	HASIL SIMULASI KONDISI BATAS	
BIODATA PENULIS		

## DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 Elemen Sekat Bergelombang .....	6
Gambar II.2 Pelat Diafragma Pada Sekat Bergelombang .....	10
Gambar II.3 Pengurangan Ukuran Elemen.....	21
Gambar III.1 Rencana Umum Kapal Tanker 17500 LTDW .....	24
Gambar III.2 Konstruksi Sekat Bergelombang Frame 100 .....	25
Gambar III.3 Konstruksi Dalam Lower Stool .....	26
Gambar III.4 Konstruksi Upper Stool .....	27
Gambar III.5 Penampang Melintang Sekat Bergelombang.....	28
Gambar III.6 Dimensi Variasi Tinggi Lower Stool.....	30
Gambar III.7 Pemilihan Tipe Analisis.....	32
Gambar III.8 Penentuan Tipe Elemen .....	33
Gambar III.9 Penentuan Material Properties .....	33
Gambar III.10 Penentuan Massa Jenis Material.....	34
Gambar III.11 Penentuan Ketebalan Elemen .....	34
Gambar III.12 Penentuan Ukuran Mesh Pada Model.....	36
Gambar III.13 Hasil Mesh Sekat Bergelombang.....	36
Gambar III.14 Hasil Mesh Pada Fine Mesh Zone .....	37
Gambar III.15 Grafik Beban Statis Akibat Muatan.....	38
Gambar III.16 Pembuatan Fungsi Beban .....	38
Gambar III.17 Aplikasi Beban Pressure ke Model Sekat Bergelombang .....	39
Gambar III.18 Aplikasi Kondisi Batas ke Model Sekat Bergelombang.....	40
Gambar III.19 Grafik Hasil Konvergensi Model 1 .....	42
Gambar III.20 Grafik Hasil Konvergensi Model 2 .....	44
Gambar III.21 Grafik Hasil Konvergensi Model 3 .....	45
Gambar III.22 Ilustrasi Hasil Perhitungan Berat Konstruksi Pada Model Sekat Bergelombang .....	49
Gambar III.23 Penampang Konstruksi Sekat Bergelombang.....	50
Gambar III.24 Bagan Alir Pengerjaan Tugas Akhir.....	52
Gambar IV.1 Tegangan Konstruksi Pada Model 1A.....	53
Gambar IV.2 Deformasi Pada Model 1A .....	54
Gambar IV.3 Tegangan Konstruksi Pada Model 1B.....	55
Gambar IV.4 Deformasi Pada Model 1B .....	56
Gambar IV.5 Tegangan Konstruksi Pada Model 1C .....	57
Gambar IV.6 Deformasi Pada Model 1C .....	57
Gambar IV.7 Grafik Tegangan Maksimum Pada Variasi Model 1 .....	59
Gambar IV.8 Grafik Deformasi Maksimum Pada Variasi Model 1 .....	59
Gambar IV.9 Tegangan Konstruksi Pada Model 2A.....	61
Gambar IV.10 Deformasi Pada Model 2A .....	61
Gambar IV.11 Tegangan Konstruksi Pada Model 2B.....	62
Gambar IV.12 Deformasi Pada Model 2B .....	63
Gambar IV.13 Tegangan Konstruksi Pada Model 2C.....	64
Gambar IV.14 Deformasi Pada Model 2C .....	64
Gambar IV.15 Grafik Tegangan Maksimum Pada Variasi Model 2 .....	66

Gambar IV.16 Grafik Deformasi Maksimum Pada Variasi Model 2.....	66
Gambar IV.17 Tegangan Konstruksi Pada Model 3A.....	68
Gambar IV.18 Deformasi Pada Model 3A .....	68
Gambar IV.19 Tegangan Konstruksi Pada Model 3B.....	69
Gambar IV.20 Deformasi Pada Model 3B .....	70
Gambar IV.21 Tegangan Konstruksi Pada Model 3C .....	71
Gambar IV.22 Deformasi Pada Model 3C .....	71
Gambar IV.23 Grafik Tegangan Maksimum Pada Variasi Model 3.....	73
Gambar IV.24 Grafik Deformasi Maksimum Pada Variasi Model 3.....	73
Gambar IV.25 Grafik Perubahan Tegangan Maksimum Variasi Model Sekat Bergelombang Dengan Tebal Diafragma 14 mm .....	75
Gambar IV.26 Grafik Perubahan Deformasi Maksimum Variasi Model Sekat Bergelombang Dengan Tebal Diafragma 14 mm .....	78
Gambar IV.27 Grafik Perubahan Berat Konstruksi Variasi Model Sekat Bergelombang Dengan Tebal Diafragma 14 mm .....	80
Gambar IV.28 Grafik Nilai Berat Konstruksi Pada Variasi Model 1.....	81
Gambar IV.29 Grafik Nilai Berat Konstruksi Pada Variasi Model 2.....	81
Gambar IV.30 Grafik Nilai Berat Konstruksi Pada Variasi Model 3.....	82
Gambar IV.31 Grafik Perubahan Volume Konstruksi Model Sekat Bergelombang Dengan Tebal Diafragma 14 mm.....	83
Gambar IV.32 Nilai Volume Konstruksi Pada Variasi Model 1 .....	84
Gambar IV.33 Nilai Volume Konstruksi Pada Variasi Model 2.....	84
Gambar IV.34 Nilai Volume Konstruksi Pada Variasi Model 3 .....	85



## DAFTAR TABEL

Tabel II.1 Pembagian Class Material Berdasarkan Ketebalan .....	18
Tabel III.1 Ukuran Utama Kapal Tanker 17500 LTDW .....	24
Tabel III.2 Rekapitulasi Dimensi Konstruksi Lower Stool .....	27
Tabel III.3 Ukuran Elemen Sekat Bergelombang .....	28
Tabel III.4 Variasi Ketebalan Diafragma Sekat .....	30
Tabel III.5 Variasi Model Sekat Bergelombang.....	31
Tabel III.6 Proses Konvergensi Model 1 .....	43
Tabel III.7 Proses Konvergensi Model 2.....	44
Tabel III.8 Proses Konvergensi Model 3.....	46
Tabel III.9 Hasil Uji Coba Simulasi Dengan Variasi Kondisi Batas Pada Model 1A .....	47
Tabel III.10 Lokasi Tegangan Maksimum Saat Uji Coba Simulasi.....	48
Tabel IV.1 Hasil Simulasi Model 1 .....	58
Tabel IV.2 Hasil Simulasi Model 2 .....	65
Tabel IV.3 Hasil Simulasi Model 3 .....	72
Tabel IV.4 Nilai Tegangan Maksimum Pada Setiap Variasi Model .....	74
Tabel IV.5 Perhitungan Nilai Yield Utilisation Factor.....	76
Tabel IV.6 Nilai Deformasi Maksimum Setiap Variasi Model.....	77
Tabel IV.7 Berat Konstruksi Setiap Variasi Model Sekat Bergelombang .....	79
Tabel IV.8 Nilai Volume Konstruksi Setiap Variasi Model Sekat Bergelombang .....	82



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **I.1. Latar Belakang Masalah**

Menurut IHMC (2013) berdasarkan jenis konstruksinya, sekat dibagi menjadi sekat berpenegar (*stiffened bulkhead*), dan sekat bergelombang (*corrugated bulkhead*). Setiap jenis sekat memiliki fungsi serta keuntungan dan kelemahannya masing-masing. Dalam Tugas Akhir ini, permasalahan yang akan dibahas adalah mengenai pemasangan sekat bergelombang. Sekat bergelombang banyak digunakan dalam ruang muat kapal yang membawa muatan curah. Hal tersebut didasari oleh lekukan pada sekat bergelombang banyak mengurangi kapasitas ruang yang dapat digunakan pada selain kapal curah dan pada ruang akomodasi.

Pada kapal yang mengangkut muatan curah cair seperti tanker, sekat bergelombang memiliki keuntungan lain yaitu mempermudah proses pembersihan tangki muat. Seperti yang dijelaskan oleh Konstantinos (2015) bahwa proses pembersihan tangki yang tidak sempurna dapat menyebabkan terjadinya kontaminasi muatan, dan jika masih terdapat muatan yang menempel pada ruang muat dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya kebakaran saat proses perbaikan dan perawatan kapal. Penggunaan sekat berpenegar menyebabkan beberapa bagian akan tertutupi karena adanya pemasangan penegar sekat dan permasalahan tersebut tidak dialami jika menggunakan sekat bergelombang.

Dalam *Common Structural Rules* (2012) dijelaskan bahwa pada kapal tanker dengan tinggi tangki muat lebih besar dari 16 m maka perlu pemasangan konstruksi tambahan untuk menambah kekuatan sekat. Konstruksi tambahan yang dipasang berupa *lower stool* dan diafragma. *Lower stool* merupakan konstruksi yang berbentuk landai dan dipasang pada bagian ujung bawah sekat bergelombang, sedangkan diafragma merupakan penegar horizontal dipasang pada lekukan sekat dengan ketinggian tertentu.

Penggunaan konstruksi tambahan pada sekat bergelombang memiliki kekurangan dalam hal pengurangan kapasitas tangki muat akibat penambahan volume konstruksi sekat. Efektivitas pembersihan tangki muat juga kurang optimal dengan adanya konstruksi tambahan. Diperlukan dimensi konstruksi yang efektif untuk mengoptimalkan penggunaan

*lower stool* dan penumpu horizontal. Oleh karena itu, dibutuhkan analisis kekuatan lebih lanjut pada sekat bergelombang kapal tanker untuk menentukan dimensi konstruksi *lower stool* dan diafragma sekat yang optimal.

## **I.2. Perumusan Masalah**

Berdasarkan dari latar belakang yang telah diuraikan, permasalahan yang akan dikaji dalam Tugas Akhir ini antara lain:

- a. Bagaimana ukuran *lower stool* dan diafragma sekat yang optimal untuk sekat bergelombang?
- b. Bagaimana kekuatan sekat bergelombang dengan variasi tinggi *lower stool* dan tebal diafragma sekat?

## **I.3. Tujuan**

Tujuan yang ingin dicapai dari pengerjaan Tugas Akhir ini adalah:

- a. Mendapatkan ukuran *lower stool* dan diafragma yang optimal untuk sekat bergelombang,
- b. Mengetahui kekuatan sekat bergelombang dengan pengaruh perubahan tinggi *lower stool* dan tebal diafragma sekat.

## **I.4. Batasan Masalah**

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, permasalahan yang akan dikaji dibatasi pada:

- a. Analisis kekuatan dilakukan untuk kapal tanker pada sekat melintang tangki muat daerah midship,
- b. Perhitungan beban dilakukan pada kondisi muatan penuh,
- c. Beban pada konstruksi akibat berat muatan diabaikan,
- d. Perhitungan konstruksi mengacu pada peraturan *Common Structural Rules (CSR) For Double Hull Oil Tanker International Association of Classification Societies (IACS)*,
- e. Perhitungan kekuatan konstruksi dilakukan dengan metode elemen hingga,
- f. Variasi dilakukan pada tinggi *lower stool* dan tebal diafragma,
- g. Modulus elemen sekat bergelombang tidak mengalami perubahan pada setiap variasi,
- h. Penentuan variasi mengabaikan sambungan las pada sekat,
- i. Pemodelan sekat disesuaikan dengan kapasitas perangkat yang tersedia.

### **I.5. Manfaat**

Manfaat yang diharapkan dari pengerjaan Tugas Akhir ini adalah:

- a. Sebagai informasi guna meningkatkan pengetahuan di bidang perkapalan,
- b. Untuk memperkaya khasanah ilmu pengetahuan terutama dalam bidang konstruksi kapal,
- c. Sebagai bentuk pengaplikasian ilmu yang diperoleh secara teoritis,
- d. Sebagai pertimbangan dalam menentukan desain konstruksi sekat bergelombang dalam tangki muat kapal tanker.

### **I.6. Hipotesis**

Hipotesis dari analisis dalam Tugas Akhir ini adalah penambahan tinggi *stool* dan tebal diafragma akan menurunkan nilai tegangan konstruksi, tetapi akan mengurangi volume ruang muat dan menambah berat konstruksi.

Halaman ini sengaja dikosongkan



## **BAB II**

### **STUDI LITERATUR**

#### **II.1. Sekat Bergelombang**

Berdasarkan jenis konstruksinya, menurut IHMC (2013) sekat terbagi menjadi dua, yaitu sekat berpenegar (*stiffened bulkhead*), dan sekat bergelombang (*corrugated bulkhead*). Konstruksi sekat berpenegar terdiri dari pelat datar dan penegar sekat, seperti profil *bulb*, profil L, dsb. Sekat berpenegar memiliki ketebalan pelat terbesar pada bagian bawah sekat dan semakin berkurang pada posisi yang lebih tinggi. Lajur pelat pada sekat berpenegar disusun secara horizontal.

Sekat bergelombang terdiri dari pelat paralel, dan pelat miring yang menghubungkan dua pelat paralel. Kedua pelat tersebut memiliki kekuatan yang sama dalam menahan tekanan cairan dan keduanya dapat memiliki ketebalan yang sama dengan lebar yang sama. Dalam hal itu, sekat bergelombang bisa dibuat dari satu lembar pelat dengan cara ditekuk (*bending*). (Okumoto, *et al.*, 2008)

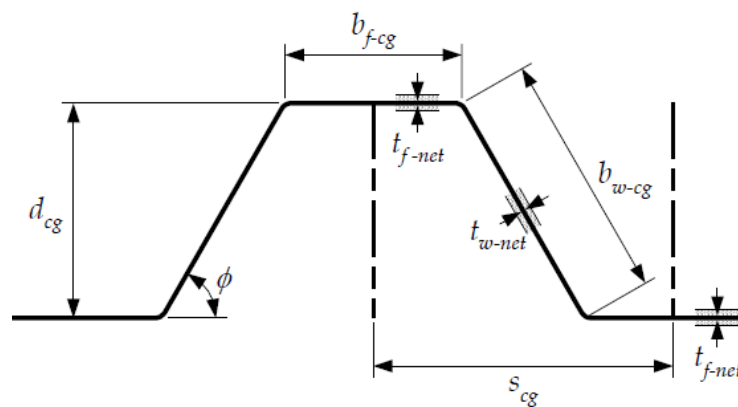
Menurut Konstantinos (2015), terdapat dua jenis pengelompokan utama untuk sekat bergelombang berdasarkan arah lekukannya, yaitu sekat dengan lekukan vertikal, dan sekat dengan lekukan horizontal. Sekat dengan lekukan vertikal (*vertically corrugated*) dapat dipasang tanpa menggunakan konstruksi *upper stool*, hanya memasang *lower stool*, atau dapat dipasang keduanya tergantung pada jenis kapal. Kedua macam arah lekukan tersebut dapat digunakan baik pada sekat melintang, maupun pada sekat memanjang.

Menurut Eyres (2001), lajur pelat pada sekat bergelombang yang telah dibentuk (bergelombang) disusun secara vertikal seperti halnya penegar pada sekat melintang. Kemudian ia juga menjelaskan bahwa pembuatan gelombang pada pelat dilakukan sebelum proses fabrikasi sekat sehingga lajur pelat sekat dibagi secara vertikal dan memiliki ketebalan mengikuti tebal pelat di bagian ujung bawah sekat. Hal tersebut menyebabkan berat pelat bergelombang menjadi sedikit lebih berat dibanding pelat pada sekat berpenegar, dan sampai pada ketebalan pelat tertentu berat sekat akan lebih ringan daripada dengan penggunaan penegar. Dengan demikian, meskipun sekat bergelombang memiliki kekurangan yaitu berat konstruksi sedikit lebih besar dibandingkan sekat berpenegar, tetapi dengan desain yang

efektif kekurangan tersebut dapat diminimalisasi sehingga penggunaan sekat bergelombang menjadi lebih menguntungkan dari sekat berpenegar.

### II.1.1. Elemen Sekat Bergelombang

Menurut *Common Structural Rules* atau CSR (2012) sekat bergelombang terbagi menjadi dua jenis pelat, yaitu pelat hadap (*face plate*) dan pelat bilah (*web plate*). Pelat hadap merupakan pelat yang tersusun paralel, sedangkan pelat bilah adalah pelat miring yang menghubungkan antar pelat hadap satu dengan pelat hadap lainnya. Satu elemen sekat bergelombang terdiri dari dua pelat bilah yang menghubungkan sebuah pelat hadap dengan dua pelat hadap lain yang memiliki lebar hanya setengah lebar pelat hadap seperti yang ditunjukkan pada Gambar II.1.



Gambar II.1 Elemen Sekat Bergelombang

Sumber: IACS, 2012

Gambar II.1 menunjukkan potongan penampang melintang dari sebuah elemen sekat bergelombang. Elemen sekat bergelombang terdiri dari beberapa komponen ukuran yang menunjukkan dimensi dari elemen sekat tersebut, komponen ukuran dari sebuah elemen sekat bergelombang terdiri dari:

1. Kedalaman lekukan ( $d_{cg}$ ) merupakan jarak antar dua pelat hadap;
2. Sudut lekukan ( $\phi$ ) adalah sudut yang dibentuk oleh proyeksi pelat bilah terhadap pelat hadap;
3. Jarak lekukan ( $s_{cg}$ ) yaitu jarak antara titik tengah lebar dari dua pelat hadap yang berdekatan;
4. Lebar pelat hadap ( $b_{f-cg}$ );

5. Tebal pelat hadap ( $t_{f-net}$ );
6. Lebar pelat bilah ( $b_{w-cg}$ ); dan
7. Tebal pelat bilah ( $t_{w-net}$ ).

### II.1.2. Kekuatan Sekat Bergelombang

Dalam *Common Structural Rules* (2012) modulus penampang dari elemen sekat bergelombang di bagian ujung atas, ujung bawah, dan tengah sekat dihitung berdasarkan beban terbesar yang terjadi pada sekat. Modulus penampang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Z_{cg-net} = \frac{1000 M_{cg}}{C_{s-cg} \sigma_{yd}} \quad \text{II.1}$$

Dimana:

$$M_{cg} = \frac{C_i |P| s_{cg} l_o^2}{12000} \quad (\text{kNm})$$

$$P = \frac{P_u + P_l}{2} \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$P_l, P_u = \text{beban pada bagian ujung bawah dan ujung atas sekat bergelombang} \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$s_{cg} = \text{jarak antar lekukan, yang ditunjukkan pada Gambar II.1} \quad (\text{m})$$

$$l_o = \text{lebar } bending \text{ efektif sekat bergelombang, yang diukur dari setengah tinggi } lower \text{ stool} \text{ sampai setengah tinggi } upper \text{ stool} \quad (\text{m})$$

$$C_i = \text{koefisien momen } bending \text{ yang merupakan fungsi dari dimensi penampang } lower \text{ stool} \text{ dan } upper \text{ stool} \quad (\text{m})$$

$$C_{s-cg} = \text{koefisien tegangan tekuk yang diperbolehkan pada setengah panjang lekukan}$$

$$\sigma_{yd} = \text{kuat tarik minimum material} \quad (\text{N/mm}^2)$$

Dari persamaan II.1, dijelaskan bahwa modulus sekat bergelombang ditentukan oleh dimensi penampang *lower stool* dan *upper stool*. Tinggi *upper stool* dan *lower stool* mempengaruhi letak titik acuan dalam perhitungan beban sekat, karena titik acuan pembebanan sekat dihitung pada ujung bawah dan ujung atas sekat yang dapat berubah karena adanya *lower stool* dan *upper stool*. Penambahan ketinggian *lower stool* menyebabkan letak titik acuan pembebanan pada ujung bawah sekat bergelombang menjadi semakin ke atas,

sama halnya dengan pengurangan tinggi *upper stool* yang juga menyebabkan titik acuan pembebanan pada ujung atas sekat menjadi semakin ke atas. Hal tersebut sangat berpengaruh pada pembebanan akibat beban statis muatan yang merupakan lingkup pembahasan dalam Tugas Akhir ini. Dalam perhitungan beban statis muatan, letak titik acuan yang semakin tinggi akan menyebabkan berkurangnya nilai beban yang terjadi di titik tersebut. Penjelasan mengenai beban statis muatan akan dijelaskan lebih lanjut pada sub-bab berikutnya.

Perubahan tinggi *upper stool* dan *lower stool* juga mempengaruhi lebar *bending* efektif sekat bergelombang. Semakin tinggi *upper stool* dan *lower stool* maka lebar *bending* efektif sekat bergelombang akan semakin kecil. Hal tersebut juga menambah kekuatan sekat bergelombang karena pada modulus yang sama apabila nilai lebar *bending* efektif semakin kecil maka beban yang dapat diterima oleh konstruksi sekat akan semakin besar.

## **II.2. Konstruksi *Lower Stool***

Menurut Konstantinos (2015), *lower stool* merupakan sebuah struktur yang memiliki bentuk seperti kotak dan berfungsi untuk menopang sekat bergelombang pada ujung bawah sekat. Hal tersebut menyebabkan sekat bergelombang tidak bertemu secara langsung dengan pelat alas ganda, melainkan pada pelat atas *lower stool*. Konstruksi *stool* dipasang karena pada kapal yang berukuran besar, panjang bentangan sekat bergelombang akan bertambah dan mengakibatkan tegangan yang berlebihan pada sekat. Hal tersebut dapat diantisipasi dengan pemasangan konstruksi *stool* yang menyebabkan bentangan sekat akan berkurang. Beban yang dialami pada konstruksi sekat juga akan terdistribusi secara lebih baik dengan pemasangan konstruksi *stool*. Pemasangan *lower stool* juga menyebabkan kekuatan pada ujung bawah sekat yang diakibatkan oleh tegangan geser dan tegangan puntir.

Dalam *Common Structural Rules* (2012) konstruksi *lower stool* didefinisikan sebagai konstruksi yang terletak pada ujung bawah dari sebuah sekat bergelombang. Pada ujung atas konstruksi ini disebut *upper stool* dan pada ujung bawah disebut *lower stool*. Secara umum, pemasangan *stool* diatur bahwa *upper stool* wajib dipasang pada setiap kapal tanker lambung ganda (*double hull*), sedangkan untuk *lower stool* peraturan tersebut mewajibkan pemasangannya pada kapal tanker lambung ganda yang memiliki tinggi *moulded* 16 m ke atas. Untuk kapal yang tidak mencapai kriteria tersebut, konstruksi *lower stool* dapat dihilangkan tetapi dengan ketentuan-ketentuan khusus. Lingkup permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini hanya sebatas pada konstruksi *lower stool* untuk sekat bergelombang di dalam tangki muat.

Ketentuan pemasangan konstruksi *lower stool* pada sekat bergelombang diatur dalam *Common Structural Rules* (2012) antara lain, sebagai berikut:

1. Ketentuan umum

- Tinggi *lower stool* tidak boleh kurang dari kedalaman lekukan bergelombang,
- *Lower stool* dipasang sejajar dengan wrang alas ganda atau *girder*,
- Penegar sisi dan diafragma vertikal di dalam *lower stool* sebisa mungkin dipasang sejajar dengan konstruksi pada bagian bawah (alas ganda) untuk menjaga transmisi beban dari sekat ke struktur alas ganda.

2. Pelat atas *lower stool*

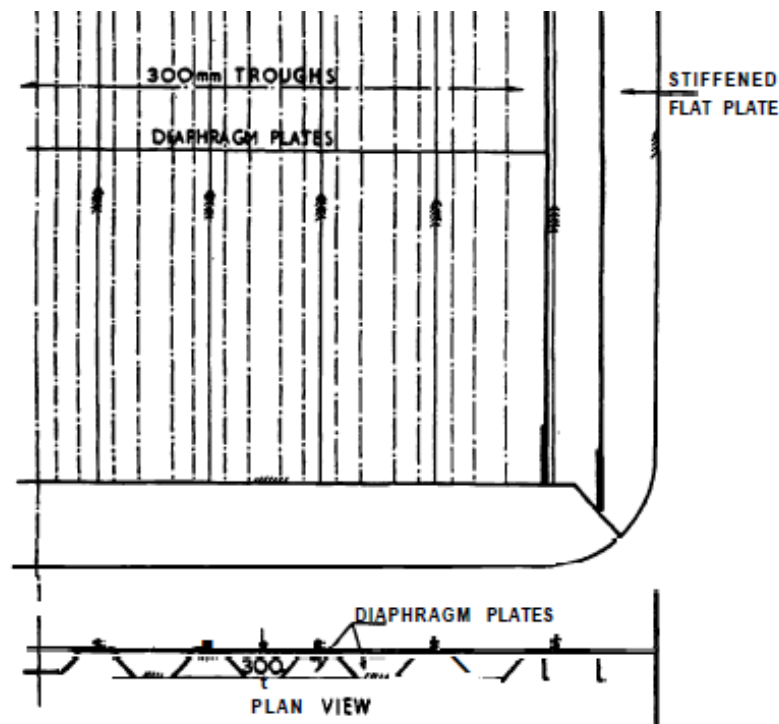
- Ketebalan pelat atas *lower stool* tidak boleh kurang dari ketebalan pelat sekat bergelombang, *yield strength* material juga harus sama dengan material untuk sekat,
- Panjang pelat atas *lower stool* dilebihkan yang panjangnya tidak boleh kurang dari tebal pelat hadap sekat bergelombang.

3. Pelat sisi dan struktur internal *lower stool*

- Pelat sisi *lower stool* tidak boleh memiliki ketebalan kurang dari 90% tebal pelat hadap pada daerah pertemuan dengan pelat atas sampai setinggi kedalaman lekukan sekat bergelombang,
- Ketebalan pelat sisi dan modulus penampang penegar sisi *lower stool* tidak boleh kurang dari hasil perhitungan untuk pelat dan penegar pada sekat memanjang atau melintang,
- Pada kedua ujung penegar sisi *lower stool* harus dipasang braket,
- Kontinuitas konstruksi sebisa mungkin harus dijaga antara bilah sekat bergelombang dengan braket penyangga di dalam *stool*. Ketebalan braket tidak boleh kurang dari 80% ketebalan pelat bilah dan setidaknya memiliki *yield strength* material yang sama,
- *Scallops* tidak diperbolehkan pada diafragma di pertemuan antara pelat sisi *lower stool* dengan alas dalam dan pertemuan dengan pelat atas *lower stool*.

### II.3. Konstruksi Diafragma Sekat Bergelombang

Diafragma sekat merupakan konstruksi yang terdiri dari pelat datar yang dipasang pada sekat bergelombang pada ketinggian tertentu. Menurut Stokoe (1996) pada sekat bergelombang dengan lekukan pada arah vertikal, beban yang terjadi sepanjang lekukan sekat akan memungkinkan lekukan pada sekat tersebut akan melipat ke arah horizontal. Dan untuk mencegah terjadinya permasalahan tersebut, dia juga menjelaskan bahwa perlu adanya pemasangan diafragma sekat sepanjang lekukan pada arah horizontal. Diafragma sekat berlaku sebagai penguat horizontal yang menambah kekuatan melintang sekat bergelombang. Diafragma sekat dipasang pada sekat bergelombang pada ketinggian tertentu seperti yang terlihat pada Gambar II.2.



Gambar II.2 Pelat Diafragma Pada Sekat Bergelombang

Sumber: Stokoe, 1996

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar II.2, pelat diafragma sekat dipasang secara melintang pada tiap lekukan sekat bergelombang yang berfungsi seperti penegar horizontal pada sekat berpenegar. Okumoto, *et al.* (2008) juga menjelaskan bahwa sekat bergelombang memiliki kekakuan yang rendah terhadap pembebanan yang searah dengan arah lekukan sehingga diperlukan pemasangan konstruksi tambahan berupa penegar horizontal. Penegar horizontal dipasang pada kedua sisi lekukan pada sekat bergelombang.



## II.4. Beban Lokal Statis Muatan

Beban statis yang terjadi pada lingkup kecil (lokal) menurut *Common Structural Rules* (2012) dibagi menjadi 4, yaitu:

1. Tekanan statis air laut
2. Tekanan statis tangki
3. *Tank overpressure*
4. Beban statis geladak

Lingkup permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini menggunakan pembebanan statis akibat muatan dalam tangki muat, berupa tekanan statis tangki. Pembebanan akibat muatan dihitung menggunakan tekanan hidrostatik tangki dan tekanan *testing* tangki. Beban pada konstruksi sekat bergelombang dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_{in-tk} = \rho g z_{tk} \quad \text{II.2}$$

$$P_{in-test} = \rho_{sw} g z_{test} \quad \text{II.3}$$

$$P_{in-test} = \rho_{sw} g z_{tk} + P_{valve} \quad \text{II.4}$$

Dimana:

$P_{in-tk}$	= tekanan hidrostatik tangki	(kN/m <sup>2</sup> )
$P_{in-test}$	= tekanan <i>testing</i> tangki	(kN/m <sup>2</sup> )
$\rho, \rho_{sw}$	= massa jenis air laut	(ton/m <sup>3</sup> )
$g$	= gaya gravitasi	(m/s <sup>2</sup> )
$z_{tk}$	= jarak vertikal titik acuan pembebanan ke ujung atas tangki	(m)
$z_{test}$	= jarak vertikal titik acuan pembebanan ke 2.4 m diatas ujung atas tangki atau ke ujung atas pipa limbah, diambil nilai terbesar	(m)
$P_{valve}$	= tekanan pada katup	(kN/m <sup>2</sup> )

Dari ketiga persamaan perhitungan pembebanan, dihitung nilai beban yang terjadi pada sekat bergelombang. Pembebanan dihitung dengan nilai yang terbesar diantara ketiga persamaan.

## II.5. Metode Elemen Hingga

Dalam metode elemen hingga, menurut Rao (2011), sebuah kontinum atau wujud dari unsur; seperti benda padat, cair, atau gas; direpresentasikan menjadi sebuah susunan dari bagian yang terbagi-bagi yang disebut elemen hingga. Elemen-elemen tersebut saling terhubung pada titik pertemuan yang disebut noda atau *nodal points*. Dalam metode elemen hingga, variabel yang terdapat dalam kontinum; seperti tegangan, perpindahan, temperature, tekanan, dan kecepatan; diasumsikan dan didefinisikan dengan pendekatan menggunakan fungsi sederhana. Fungsi tersebut, yang juga disebut sebagai interpolasi model, didefinisikan menjadi sebuah nilai pada noda-noda dalam elemen. Dan dengan menyelesaikan persamaan elemen hingga maka nilai noda (*nodal values*) dapat diketahui.

Analisis menggunakan metode elemen hingga, secara umum terbagi menjadi beberapa tahap. Tahapan tersebut dijelaskan oleh Logan (2007) sebagai berikut:

1. Pembagian dan pemilihan tipe elemen

Tahap pertama yang dilakukan adalah melakukan pembagian pada struktur menjadi sebuah sistem elemen hingga dan melakukan pemilihan tipe elemen yang sesuai serta mendekati keadaan sesungguhnya. Penentuan jumlah elemen yang dibentuk dan variasi ukuran serta tipe elemen pada struktur dilakukan berdasarkan pengalaman. Elemen harus dibentuk sekecil mungkin untuk memperoleh hasil yang sesuai dan juga sebesar mungkin untuk mengurangi proses perhitungan komputasi.

2. Penentuan fungsi displasmen

Dalam tahap ini dilakukan penentuan fungsi displasmen pada tiap elemen yang telah terbentuk. Fungsi tersebut didefinisikan menjadi *nodal values* pada elemen. Fungsi dibuat sesederhana mungkin untuk mempermudah proses analisis elemen, yang biasanya menggunakan jenis fungsi seperti fungsi linier, fungsi kuadrat, atau polinomial.

3. Penentuan hubungan regangan – displasmen (*strain – displacement*) dan tegangan – regangan (*stress – strain*)

Hubungan regangan – displasmen dan tegangan – regangan merupakan hal yang penting dalam penurunan persamaan elemen hingga. Secara sederhana pengaruh regangan dan displasmen pada model satu dimensi dengan regangan yang kecil dapat ditentukan dengan persamaan II.5, sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{II.5}$$

Dimana:

$\varepsilon$  = regangan yang terjadi pada struktur

$\Delta l$  = perubahan panjang yang terjadi pada struktur (m)

$l_0$  = panjang awal struktur (m)

Untuk hubungan antara tegangan dan regangan yang biasa digunakan dalam analisis tegangan, secara sederhana pada model satu dimensi dapat ditentukan menggunakan hukum Hooke yang ditunjukkan dalam persamaan II.6, sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{II.6}$$

Dimana:

$\sigma$  = tegangan yang terjadi pada struktur (N/m<sup>2</sup>)

$F$  = gaya yang dialami struktur (N)

$A$  = luas penampang struktur (m<sup>2</sup>)

#### 4. Penurunan persamaan dan matriks kekakuan elemen

Dalam menentukan persamaan elemen dan matriks kekakuan elemen dapat menggunakan tiga metode utama, yaitu:

##### a. *Direct Equilibrium Method*

Dengan metode ini, matriks kekakuan elemen dan persamaan elemen yang menyatakan hubungan antara gaya dan perpindahan nodal didapatkan menggunakan kondisi kesetimbangan gaya untuk sebuah elemen sederhana.

##### b. *Work or Energy Methods*

Untuk melakukan penurunan persamaan dan matriks kekakuan pada elemen dengan bentuk geometri dua dimensi dan tiga dimensi akan lebih mudah apabila menggunakan *work or energy method*. Dengan metode ini, penurunan persamaan elemen dapat diperoleh menggunakan pendekatan prinsip *virtual work*

(menggunakan *virtual displacement*), prinsip energi potensial minimum, dan teori Castigliano.

c. *Methods of Weighted Residuals*

Dalam metode ini, penurunan persamaan dan matriks kekakuan elemen diperoleh menggunakan metode Galerkin. Dengan menggunakan metode ini, hasil yang diperoleh akan sama dengan hasil dari *energy methods*. Metode ini akan menghasilkan persamaan yang mendefinisikan respon dari sebuah elemen. Respon elemen diperoleh menggunakan persamaan II.7, sebagai berikut:

$$\{f\} = [k]\{d\} \quad \text{II.7}$$

Dimana:

$\{f\}$  = vektor dari gaya noda elemen (N)

$[k]$  = matriks kekakuan elemen (N/m)

$\{d\}$  = vektor dari derajat kebebasan noda elemen , pada tahap ini nilainya belum diketahui, atau vektor dari perpindahan noda elemen, n (m)

5. Penurunan persamaan elemen untuk mendapatkan persamaan global atau persamaan total dan kondisi batas

Dari persamaan yang didapat pada tahap-tahap sebelumnya, persamaan elemen secara keseluruhan pada struktur yang dianalisis dapat diperoleh pada tahap ini. Persamaan elemen secara global diperoleh dengan persamaan II.8, sebagai berikut:

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad \text{II.8}$$

Dimana:

$\{F\}$  = vektor dari gaya nodal secara global (N)

$[K]$  = total matriks kekakuan elemen secara global dari struktur (N/m)

$\{d\}$  = vektor dari derajat kebebasan elemen, beberapa nilainya telah diperoleh dari persamaan II.7, atau vektor dari perpindahan noda elemen (n) (m)

#### 6. Penyelesaian vektor dari derajat kebebasan

Pada tahap sebelumnya, nilai vektor dari derajat kebebasan atau perpindahan noda elemen belum diketahui secara keseluruhan. Nilai yang belum diketahui diperoleh menggunakan metode eliminasi (metode Gauss) atau metode Gauss-Seidel.

#### 7. Perhitungan regangan dan tegangan elemen

Untuk permasalahan analisis tegangan struktur, nilai regangan dan tegangan (atau momen dan tegangan geser) dapat diperoleh dari nilai displasmen hasil penurunan persamaan II.8 pada tahap 5 dan 6. Untuk menghitung nilai regangan dan tegangan elemen dapat digunakan persamaan II.5 dan II.6.

#### 8. Interpretasi hasil perhitungan

Tahap terakhir dalam analisis menggunakan metode elemen hingga adalah interpretasi dan analisis hasil perhitungan untuk keperluan desain. Penentuan lokasi terjadinya deformasi dan tegangan yang besar dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam proses desain atau analisis.

Menurut Weck dan Kim (2004), penggunaan metode elemen hingga dalam proses analisis sebuah struktur memiliki keuntungan sebagai berikut:

1. Dapat menyelesaikan struktur dengan geometri yang sangat kompleks;
2. Cakupan jenis permasalahan yang dapat diselesaikan menggunakan metode elemen hingga sangat luas;
3. Mampu melakukan analisis dengan kondisi batas yang kompleks;
4. Dapat menyelesaikan permasalahan dengan pembebanan yang kompleks.

Permasalahan yang dapat dianalisis menggunakan metode elemen hingga antara lain adalah mekanika, dinamika, permasalahan panas, fluida, dan permasalahan elektrostatis. Weck dan Kim (2004) juga menjelaskan kekurangan pada metode elemen hingga, yaitu sebagai berikut:

1. Metode elemen hingga tidak dapat melakukan analisis pada permasalahan *closed-form*, yaitu permasalahan yang memerlukan pemeriksaan respon dari sistem yang berubah dengan banyak parameter;
2. Solusi yang dihasilkan merupakan nilai pendekatan;

3. Metode elemen hingga memiliki kesalahan inheren, antara lain adalah geometri yang disederhanakan dengan pembuatan elemen, dan kondisi pada elemen didefinisikan menggunakan pendekatan polinomial;
4. Kesalahan dalam penentuan tipe, sifat, dan kondisi elemen dapat berakibat fatal.

## **II.6. Analisis Elemen Hingga Dibantu Komputer**

Analisis Elemen Hingga / *Finite Element Analysis* (FEA), menurut Hoque (2016), merupakan prosedur yang digunakan dalam proses analisis tegangan. Prosedur tersebut juga dapat digunakan untuk menganalisis permasalahan pada aliran fluida, *heat transfer*, pelumasan, elektrik, magnetik, dan lain-lain. Analisis Elemen Hingga dilakukan menggunakan model dari sebuah struktur yang terbagi menjadi elemen-elemen yang lebih kecil. Setiap elemen tersebut merupakan bentuk geometri yang lebih sederhana, dan dengan geometri yang lebih sederhana maka proses analisis akan lebih mudah dilakukan. Setiap elemen dianalisis secara individu dengan memperhatikan interaksi antar elemen.

Hoque (2016) menambahkan juga bahwa analisis elemen hingga akan menghasilkan banyak persamaan yang kemudian perhitungannya dilakukan secara komputasi. Menurutya, tingkat keakuratan dalam menggunakan prosedur ini sangat rendah, meskipun demikian kesalahan perhitungan dapat berkurang seiring dengan bertambahnya jumlah persamaan yang dihitung.

Pemodelan sebuah struktur menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga terdiri dari tiga proses utama, yaitu *pre-processor*, *solver*, dan *post-processor*. Menurut Hoque (2016) ketiga proses tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. *Pre-processor* merupakan tahap awal dalam proses pemodelan struktur dimana dilakukan persiapan data model yang meliputi konektivitas *node*, aplikasi kondisi batas dan beban pada geometri, serta penentuan informasi material model. Dalam proses ini, model struktur dibagi menjadi elemen-elemen hingga yang disebut dengan pembuatan *mesh*.
2. Setelah model selesai dibuat kemudian masuk pada proses *solver*. Proses ini merupakan tahap perhitungan dalam proses pemodelan struktur. Kondisi batas dan beban yang telah diaplikasikan pada model akan dihitung menggunakan persamaan elemen hingga. Dari proses perhitungan tersebut diperoleh hasil pada tiap *node* sesuai dengan tipe analisis yang digunakan.



3. Tahap terakhir adalah penampilan hasil dari perhitungan komputasi dalam proses *solver*, yang disebut *post-processor*. Hasil perhitungan ditunjukkan dalam bentuk grafis sesuai dengan interpretasi yang dipilih.

## II.7. Tegangan Von Mises

Menurut Hoque (2016), tegangan von mises merupakan kombinasi dari semua komponen tegangan, yang terdiri dari tegangan normal pada tiga sumbu, dan tegangan geser, yang bereaksi pada tempat tertentu. Tegangan von mises cocok digunakan untuk material *ductile*. Tegangan von mises yang menghasilkan nilai di atas *yield strength* material maka material tersebut akan memberikan respon kekuatan sebesar nilai *yield strength* material itu sendiri. Apabila tegangan von mises menghasilkan nilai melebihi *ultimate strength* maka material akan pecah. Perhitungan nilai tegangan von mises dari sebuah struktur dapat menggunakan persamaan II.9, sebagai berikut:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{I_1^2 - 3I_2} \quad \text{II.9}$$

Dimana:

$\sigma_{vm}$	= tegangan von mises yang terjadi pada struktur	(N/mm <sup>2</sup> )
$I_1$	= $\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$	
$I_2$	= $\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x + \tau_x^2 + \tau_y^2 + \tau_z^2$	
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	= tegangan yang terjadi pada sumbu-x, -y, dan -z	(N/mm <sup>2</sup> )
$\tau_x, \tau_y, \tau_z$	= tegangan geser yang terjadi pada sumbu-x, -y, dan -z	(N/mm <sup>2</sup> )

## II.8. Model Sekat Bergelombang

Untuk permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini, pemodelan struktur dilakukan pada sekat bergelombang di dalam ruang muat kapal tanker. Pemodelan sekat bergelombang diambil pada sekat bergelombang di daerah *midship*. Berdasarkan *Common Structural Rules* (2012), sekat bergelombang dan *stool* dimodelkan dengan geometri luasan menggunakan tipe elemen *shell*. Diafragma dan penegar di dalam *stool* juga dimodelkan dalam pemodelan sekat bergelombang. Model sekat bergelombang dibuat dengan ketentuan sebagai berikut:

1. Ukuran *mesh* tipe elemen *shell* untuk pelat hadap dan bilah pada sekat bergelombang secara umum mengikuti jarak penegar di dalam *stool*;

2. Ketika terjadi masalah dalam proses *mesh* pada sambungan antara sekat bergelombang dengan *stool*, diperbolehkan untuk mengubah *mesh* pada *stool* dengan tujuan agar bentuk geometri sekat bergelombang tidak berubah. Walaupun demikian, perubahan bentuk lekukan dengan tujuan untuk membuat model yang lebih sederhana perlu ditinjau lebih lanjut untuk tegangan yang terjadi pada model tersebut;
3. Untuk sekat bergelombang yang tidak menggunakan *stool*, diperlukan perubahan geometri dengan tujuan untuk membuat model yang lebih sederhana. Perubahan dilakukan dengan tetap mempertahankan bentuk dan posisi lekukan serta konstruksi utama pada sekat bergelombang. Dalam hal ini, perubahan dapat dilakukan pada penegar dan sambungan antar pelat.

### II.8.1. Material Konstruksi Sekat Bergelombang

Dalam pemodelan sekat bergelombang, material yang digunakan sama seperti material yang digunakan dalam kapal sebenarnya. Menurut *Common Structural Rules* (2012) material yang digunakan pada konstruksi di daerah *midship* adalah baja *class II*. Dalam satu kelas baja dibagi lagi menjadi beberapa *grade* material berdasarkan ketebalan baja yang digunakan, pembagiannya dapat dilihat pada Tabel II.1. Baja dengan *grade A* merupakan baja dengan kekuatan tarik normal (*normal strength*), sedangkan *grade AH* merupakan baja dengan kekuatan tarik tinggi (*high tensile strength*).

Tabel II.1 Pembagian *Class* Material Berdasarkan Ketebalan

Ketebalan Baja (t)	Grade Material Baja
	<i>Class II</i>
$t \leq 15 \text{ mm}$	A, AH
$15 < t \leq 20 \text{ mm}$	A, AH

Sumber: IACS, 2012

Dalam lingkup Tugas Akhir ini, material yang digunakan untuk pemodelan konstruksi sekat bergelombang adalah baja yang memiliki kuat tarik normal dengan *grade A36*. Baja jenis tersebut merupakan baja yang banyak digunakan pada konstruksi kapal. Baja jenis tersebut merupakan baja karbon yang memiliki spesifikasi material sebagai berikut:

- Massa jenis material  $= 7850 \text{ kg/m}^3$ ;
- Modulus Young  $= 200 \text{ GPa}$  atau  $2 \times 10^{11} \text{ Pa}$ ;

- Rasio Poisson = 0.3;
- Kuat tarik (*yield strength*) = 235 N/mm<sup>2</sup>.

### II.8.2. *Local Fine Mesh Zone*

Menurut *Common Structural Rules* (2012) dalam pemodelan lokal sekat bergelombang terdapat daerah yang perlu dilakukan analisis lebih mendalam, yaitu pada sambungan antara pelat sekat dengan konstruksi *lower stool*. Pada daerah tersebut sering terjadi tegangan yang terkonsentrasi dengan nilai yang tinggi sehingga diperlukan analisis lebih mendalam dengan cara membuat ukuran *mesh* lebih kecil dibandingkan konstruksi disekitarnya, daerah tersebut disebut sebagai *fine mesh zone*.

Dalam *Common Structural Rules* (2012) bagian-bagian yang perlu dilakukan analisis lebih mendalam menggunakan *fine mesh zone* dijelaskan sebagai berikut:

1. *Main bracket toes* dan bukaan pada lokasi kritis dan *upper hopper knuckle joint* dari gading besar yang terletak di dalam tangki muat. Jika ada pemasangan sekat berlubang, bagian yang termasuk *fine mesh zone* adalah *main bracket toes* dan bukaan pada lokasi kritis dari gading besar dan penumpu vertikal;
2. *Main bracket toes* dan bukaan pada lokasi kritis dari sambungan antara gading besar dan penegar horizontal pada sekat melintang;
3. *Main bracket toes* dan bukaan pada lokasi kritis dari penumpu horizontal, sambungan antara sekat melintang dengan penumpu alas ganda atau *buttress* pada sekat melintang;
4. Sambungan antara sekat bergelombang melintang dan memanjang dengan *lower stool* atau alas ganda dan konstruksi penguat alas ganda jika tidak dipasang *lower stool*. Jika dipasang pelat *gusset*, bagian yang termasuk *fine mesh zone* adalah sambungan antara lekukan sekat dengan ujung atas dari pelat *gusset*;
5. *End bracket* dan penegar pelat bilah dari pembujur alas ganda dan geladak, serta sambungan dengan penegar vertikal dari sekat melintang. Jika pembujur dipasang di atas geladak, bagian yang termasuk *fine mesh zone* adalah sambungan pembujur dengan sekat melintang.

Dalam Tugas Akhir ini lingkup yang diambil adalah sambungan antara sekat bergelombang melintang dengan *lower stool* tanpa pelat *gusset*. Dalam melakukan analisis pada sekat bergelombang, *fine mesh zone* setidaknya berjarak 500 mm atau sama dengan ukuran 10 elemen *mesh* dari sambungan antara sekat bergelombang dengan konstruksi *lowe*

*stool* pada arah vertikal ke atas dan ke bawah. Dalam arah horizontal, *fine mesh zone* setidaknya mencakup pelat hadap sekat dan berjarak 500 mm dari pelat bilah sekat. Ukuran *mesh* pada daerah *fine mesh zone* tidak boleh lebih besar dari 50 mm x 50 mm.

Hal tersebut juga dijelaskan oleh Suga, *et. al.* (2010) bahwa pada konstruksi sekat bergelombang terdapat bagian yang rawan terjadi kerusakan yaitu adalah sambungan antara sekat bergelombang dengan pelat atas *lower stool*. Kerusakan tersebut dapat diakibatkan oleh kekuatan struktur penyangga sekat bergelombang yang tidak mencukupi untuk menahan pembebanan yang terjadi pada sekat, selain itu pada sambungan antara sekat bergelombang dan *lower stool* juga terdapat bagian yang patah sehingga pada bagian tersebut pembebanan tidak dapat terdistribusi dengan baik. Hal tersebut menyebabkan timbulnya tegangan yang terkonsentrasi.

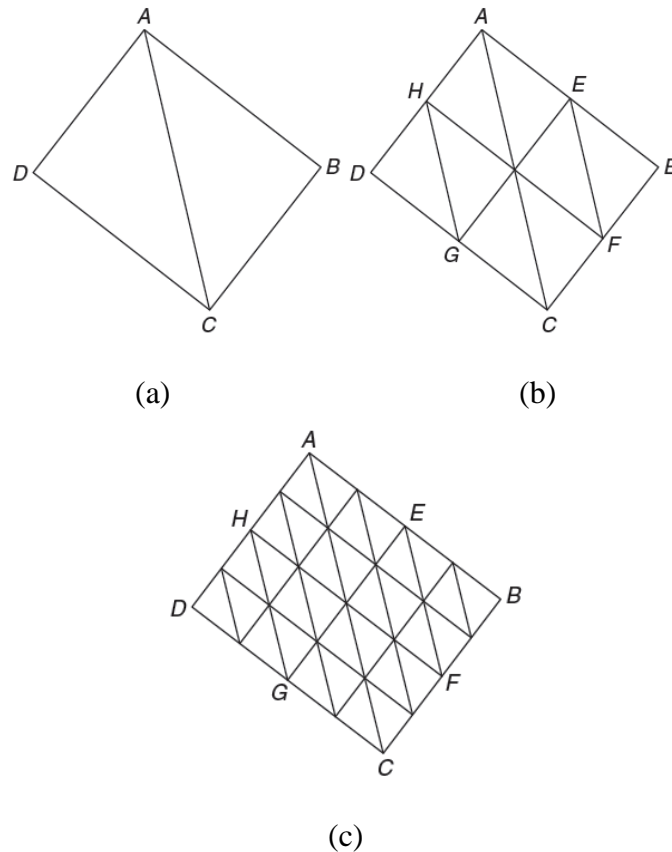
## **II.9. Konvergensi**

Menurut Rao (2011) metode elemen hingga merupakan sebuah teknik perhitungan numeris sehingga hasil perhitungan yang didapatkan menggunakan metode ini adalah nilai pendekatan dari hasil sesungguhnya. Seiring dengan berkurangnya ukuran elemen, hasil yang didapat dalam proses perhitungan akan berbeda dan berurutan. Pendekatan perhitungan akan menghasilkan nilai yang konvergen dengan hasil sesungguhnya ketika kualitas *mesh* meningkat dan elemen yang dibentuk semakin banyak dengan ukuran yang lebih kecil.

Untuk membuktikan proses konvergensi secara matematis, proses perbaikan kualitas elemen harus memenuhi beberapa kondisi sebagai berikut:

1. Hasil pembuatan *mesh* dari tahap sebelumnya harus tercakup secara keseluruhan dalam hasil pembuatan *mesh* pada tahap berikutnya dengan kualitas yang lebih baik;
2. Ukuran elemen harus dibuat lebih kecil;
3. Formulasi interpolasi polinomial pada perhitungan elemen hingga tidak boleh berubah saat proses konvergensi berlangsung.

Formulasi interpolasi polinomial dipengaruhi oleh beberapa faktor pada struktur yang akan dianalisis, yang terdiri dari sifat dan bentuk geometri; kondisi batas; serta pembebanan pada struktur. Kondisi 1 dan 2 ditunjukkan dalam Gambar II.3, yang merupakan contoh geometri 2 dimensi dengan penambahan jumlah elemen yang berukuran segitiga (*triangular*).



Gambar II.3 Pengurangan Ukuran Elemen

Dalam Gambar II.3 terlihat bahwa seiring dengan berkurangnya ukuran elemen, maka jumlah elemen yang terbentuk akan semakin banyak. Pada Gambar II.3 (a) model dibagi menjadi 2 elemen, Gambar II.3 (b) model dibagi menjadi 8 elemen, dan Gambar II.3 (c) model dibagi menjadi 32 elemen.

## II.10. Tegangan Ijin Maksimum Model

Dalam proses analisis kekuatan model struktur, tegangan yang terjadi pada konstruksi memiliki batasan tertentu sehingga tidak terjadi kegagalan pada konstruksi tersebut jika diaplikasikan pada kondisi sesungguhnya. Tegangan ijin dihitung berdasarkan kuat tarik material yang digunakan dalam proses pemodelan. Tegangan ijin maksimum yang diperbolehkan pada konstruksi kapal ditentukan oleh peraturan badan klasifikasi dimana kapal tersebut terdaftar. Setiap badan klasifikasi memiliki nilai tegangan ijin maksimum yang berbeda-beda, hal tersebut dapat terjadi karena untuk tegangan ijin maksimum konstruksi harus memiliki faktor keamanan untuk mengurangi kemungkinan terjadinya kegagalan pada konstruksi. Dalam lingkup Tugas Akhir ini, peraturan yang digunakan sebagai acuan adalah *Common Structural Rules* atau CSR (2012).

Dalam *Common Structural Rules* (2012) menjelaskan bahwa tegangan ijin maksimum model struktur dalam tangki muat dibagi menjadi dua jenis, yaitu tegangan ijin untuk pemodelan struktur secara umum dan tegangan ijin untuk model struktur dengan *fine mesh zone*. Tegangan ijin secara umum digunakan sebagai acuan pemodelan struktur tangki muat secara keseluruhan yang mencakup minimal 3 model tangki muat berurutan. Kriteria untuk tegangan ijin secara umum pada model struktur untuk pelat, dapat dihitung menggunakan persamaan II.10. Hasil dari perhitungan persamaan II.10 tidak boleh lebih besar dari 0.64 untuk pembebanan dengan beban statis.

$$\lambda_y = \frac{\sigma_{vm}}{\sigma_{yd}} \quad \text{II.10}$$

$$\lambda_y = \frac{k \sigma_{vm}}{235} \quad \text{II.11}$$

Dimana:

$\lambda_y$  = *yield utilisation factor*

$\sigma_{vm}$  = tegangan von mises pada elemen (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{yd}$  = kuat tarik material (N/mm<sup>2</sup>)

k = faktor untuk material baja dengan kekuatan yang lebih tinggi (*higher strength steel*)

Tegangan ijin untuk model struktur dengan *fine mesh zone* digunakan sebagai acuan pemodelan struktur konstruksi dalam tangki muat pada bagian yang termasuk *fine mesh zone*. Kriteria untuk tegangan ijin pada *fine mesh zone* dihitung dengan persamaan II.11. Dalam *Common Structural Rules* (2012) dijelaskan bahwa tegangan pada *fine mesh zone* dengan pembebanan akibat beban statis, hasil perhitungan dari persamaan II.11 dibagi menjadi dua kriteria berdasarkan lokasi elemen terjadinya tegangan, yaitu sebagai berikut:

1. Untuk elemen yang tidak terletak di sambungan las  $\lambda_y \leq 1.36$ ,
2. Untuk elemen yang terletak di sambungan las  $\lambda_y \leq 1.2$ .

## **BAB III METODOLOGI**

### **III.1. Studi Literatur**

Dalam Tugas Akhir ini akan dilakukan analisis kekuatan sekat bergelombang kapal tanker sehingga membutuhkan referensi yang dapat membantu proses analisis tersebut. Studi literatur dilakukan untuk mengumpulkan berbagai referensi yang dibutuhkan dalam proses analisis kekuatan sekat bergelombang kapal tanker. Referensi yang dikumpulkan berupa literatur-literatur yang membahas tentang konstruksi sekat bergelombang dan metode yang digunakan untuk menganalisis kekuatan konstruksi tersebut. Referensi dikumpulkan dari berbagai sumber yang dapat dipertanggungjawabkan.

### **III.2. Pengumpulan Data**

Pada proses ini dilakukan pengumpulan seluruh data yang berkaitan dengan konstruksi sekat bergelombang kapal tanker yang akan dianalisis dalam Tugas Akhir ini. Proses pengumpulan data tidak dilakukan secara langsung, melainkan dari sumber lain yang dapat dipertanggungjawabkan sehingga data-data yang terkumpul merupakan data sekunder dari beberapa sumber.

Data yang berkaitan dengan konstruksi sekat bergelombang kapal tanker didapatkan berupa data ukuran utama kapal, gambar rencana umum kapal, gambar pembagian blok untuk proses pembangunan kapal, dan gambar penampang melintang.

#### **III.2.1. Ukuran Utama Kapal**

Kapal yang digunakan dalam proses analisis pada Tugas Akhir ini adalah kapal tanker 17500 LTDW. Data ukuran utama kapal diambil dari sebuah sumber yang memiliki data kapal yang dibutuhkan dalam lingkup pengerjaan Tugas Akhir ini. Kapal tanker tersebut mengangkut muatan berupa minyak curah. Ukuran utama kapal ditunjukkan pada Tabel II.1.

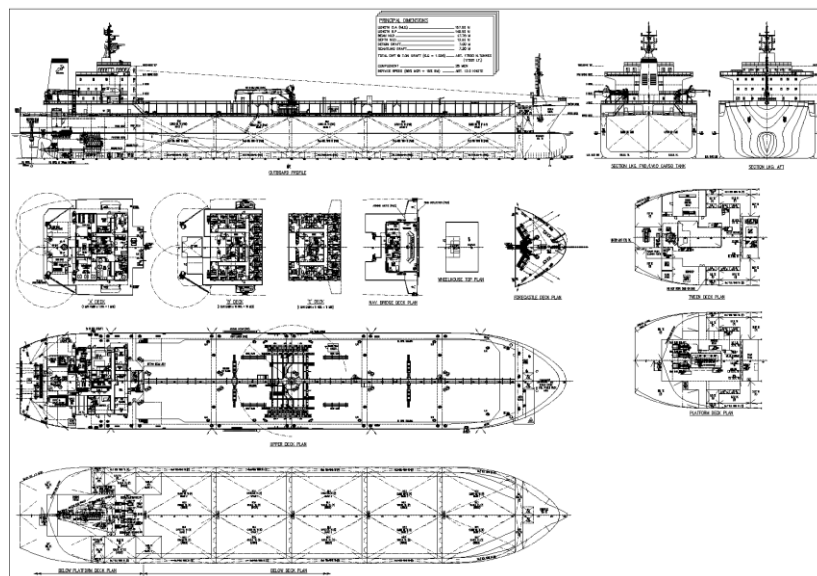
Tabel III.1 Ukuran Utama Kapal Tanker 17500 LTDW

Ukuran Utama	
<i>Length Overall</i> (LOA)	157.50 m
<i>Length Between Perpendicular</i> (LBP)	149.50 m
Lebar <i>Moulded</i> (B)	27.70 m
Tinggi <i>Moulded</i> (D)	12.00 m
Draft (T)	7.00 m
Kecepatan Dinas (Vs)	13 knots
<i>Deadweight</i> (DWT)	17500 LT

Sumber: PT XX, 2013

### III.2.2. Rencana Umum

Gambar Rencana Umum kapal berguna untuk mengetahui gambaran secara garis besar tentang konstruksi kapal keseluruhan serta konstruksi tangki muat kapal. Dalam gambar rencana umum terlihat letak tangki muat, ukuran tangki muat, dan konstruksi lain di sekitar tangki muat. Gambar Rencana Umum kapal tanker yang digunakan sebagai acuan dapat dilihat pada Gambar III.1.



Gambar III.1 Rencana Umum Kapal Tanker 17500 LTDW

Sumber: PT XX, 2013



Pada Gambar III.1 dapat dilihat bahwa kapal tanker memiliki tangki muat sebanyak 5 buah dengan 4 tangki di daerah *midship* memiliki ukuran yang sama dan satu tangki terdepan memiliki ukuran yang lebih kecil karena badan kapal bagian depan mengecil. Di bagian *centerline* terdapat sekat memanjang yang membagi tangki muat menjadi dua bagian yaitu *starboard side* dan *portside*. Kapal tersebut juga memiliki alas ganda (*double bottom*) dan lambung ganda (*double hull*) yang digunakan sebagai tangki air *ballast*. Tangki air *ballast* selain pada tangki alas ganda, dan *wing tank*; juga terdapat di bagian ceruk haluan dan ceruk buritan kapal.

Seluruh sekat melintang yang ada di dalam tangki muat kapal memiliki ukuran yang sama karena terletak pada daerah *parallel middle body*. Ruang lingkup yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini mengambil kasus pembebanan pada sekat melintang tangki muat di daerah *midship*. Sekat yang digunakan sebagai acuan adalah sekat melintang antara tangki muat No. 3 dan No. 4. Dimensi sekat yang digunakan sebagai acuan memiliki tinggi 10.65 m dan lebar 24.7 m.

### III.2.3. Blok Kapal

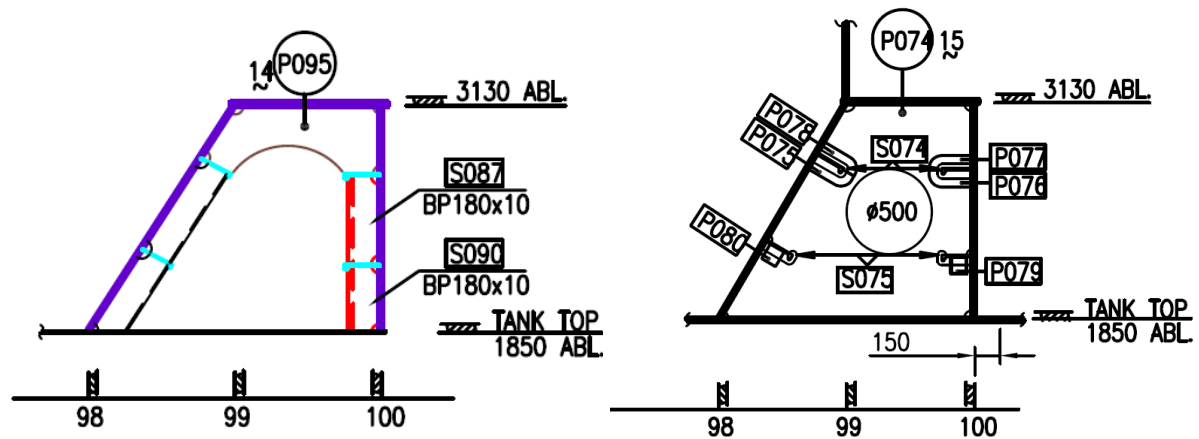
Gambar blok kapal menggambarkan konstruksi secara keseluruhan yang terdapat di dalam sebuah blok kapal. Pada gambar tersebut terdapat informasi mengenai ukuran konstruksi Sekat bergelombang pada tangki muat kapal tanker. Gambar konstruksi sekat bergelombang dapat dilihat pada Gambar II.2.



Gambar III.2 Konstruksi Sekat Bergelombang Frame 100

Sumber: PT XX, 2013

Data gambar blok yang didapat berupa gabungan antar tiga blok yaitu blok 1805, 1806, dan 1807; yang merupakan tiga blok tangki muat pada daerah *midship*. Ketiga blok tersebut terletak diantara nomor gading 88 sampai nomor gading 100. Gambar III.2 merupakan sekat bergelombang yang terletak pada nomor gading 100, sekat tersebut terletak diantara tangki muat No. 3 dan No. 4. Pada Gambar III.2 terlihat konstruksi sekat bergelombang secara garis besar. Sekat bergelombang memiliki *upper stool* dan *lower stool* yang terletak di ujung atas dan ujung bawah sekat. Gambar konstruksi dalam *lower stool* dan *upper stool* dapat dilihat berurutan pada Gambar III.3 dan Gambar III.4.



Gambar III.3 Konstruksi Dalam *Lower Stool*

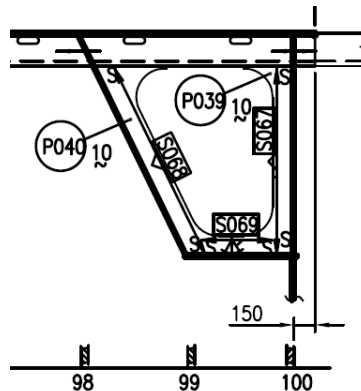
Sumber: PT XX, 2013

Pada Gambar III.3 menunjukkan konstruksi dalam *lower stool* yang terpasang pada sekat bergelombang. Konstruksi *lower stool* terletak pada nomor gading 98 sampai 100. *Lower stool* pada kapal ini berbentuk trapesium yang memiliki satu sisi miring dan satu sisi yang tegak lurus dengan pelat alas ganda. *Lower stool* memiliki tinggi sebesar 1.28 m dan panjangnya 2 jarak gading, yaitu 1.5 m. Di dalam *lower stool* terdapat konstruksi yang menambah kekuatan untuk menahan beban muatan dari tangki muat dan menyangga sekat bergelombang di atasnya. Sistem konstruksi dalam *lower stool* terdiri dari penegar vertikal, penegar horizontal, *bracket*, dan pelat diafragma. Dimensi konstruksi dalam *lower stool* dirangkum dalam Tabel III.2.

Tabel III.2 Rekapitulasi Dimensi Konstruksi *Lower Stool*

Komponen Konstruksi	Dimensi
Penegar Vertikal	BP 180 x 10 mm
Penegar Horizontal	BP 180 x 10 mm
Penegar Diafragma	FB 100 x 10 mm
Pelat Braket	14 mm
Pelat Diafragma	15 mm
Pelat Atas	16 mm
Pelat Sisi	14 mm

Sumber: PT XX, 2013



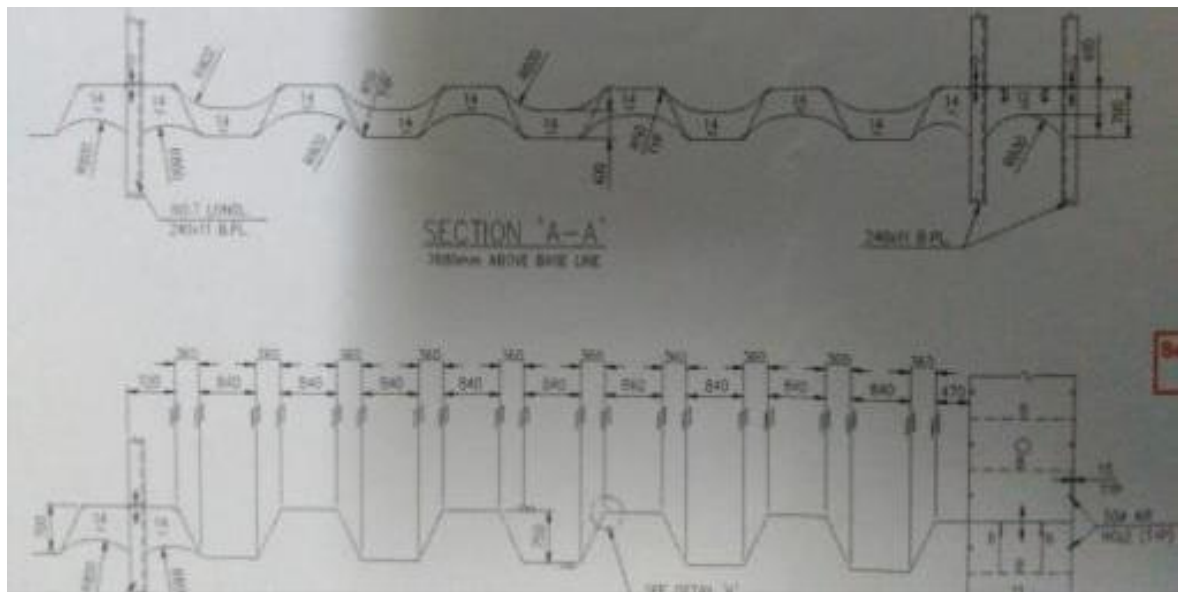
Gambar III.4 Konstruksi *Upper Stool*

Sumber: PT XX, 2013

*Upper stool* memiliki bentuk yang sama seperti *lower stool*, yang ditunjukkan pada Gambar III.4. Ketinggian *upper stool* bervariasi dari ujung sisi sampai *centerline* karena dipengaruhi *camber* geladak utama kapal, ketinggian pada ujung sisi sebesar 1.07 m dan pada *centerline* sebesar 1.57 m. Konstruksi dalam *upper stool* lebih sederhana dan memiliki modulus yang lebih kecil dibandingkan dengan konstruksi *lower stool*. Hal tersebut disebabkan karena beban akibat muatan yang diterima oleh *upper stool* lebih kecil dibandingkan dengan *lower stool*. Konstruksi *upper stool* terdiri dari pelat bawah dengan tebal 14 mm, pelat sisi setebal 10 mm, dan konstruksi internal berupa *flat bar* dengan ukuran 100 x 10 mm.

### III.2.4. Penampang Melintang Sekat Bergelombang

Gambar penampang melintang sekat bergelombang dapat dilihat pada Gambar III.5. Dari gambar tersebut didapatkan ukuran elemen sekat bergelombang, tetapi tidak menunjukkan lokasi sekat terhadap tangki muat kapal. Berdasarkan gambar Rencana Umum kapal, ukuran sekat bergelombang untuk setiap tangki muat sama sehingga Gambar III.5 dapat digunakan sebagai acuan dalam menentukan ukuran elemen sekat. Ukuran elemen sekat dirangkum dalam Tabel III.3.



Gambar III.5 Penampang Melintang Sekat Bergelombang

Sumber: PT XX, 2013

Tabel III.3 Ukuran Elemen Sekat Bergelombang

Komponen Elemen Sekat	Dimensi
Jarak Antar <i>Face Plate</i> (d)	750 mm
Tebal Pelat Elemen Sekat (t)	14 mm
Lebar <i>Face Plate</i> (b)	840 mm
Lebar <i>Web Plate</i> (s)	832 mm
Lebar Penampang Elemen (e)	2400 mm
Sudut Lekukan Elemen ( $\alpha$ )	64°

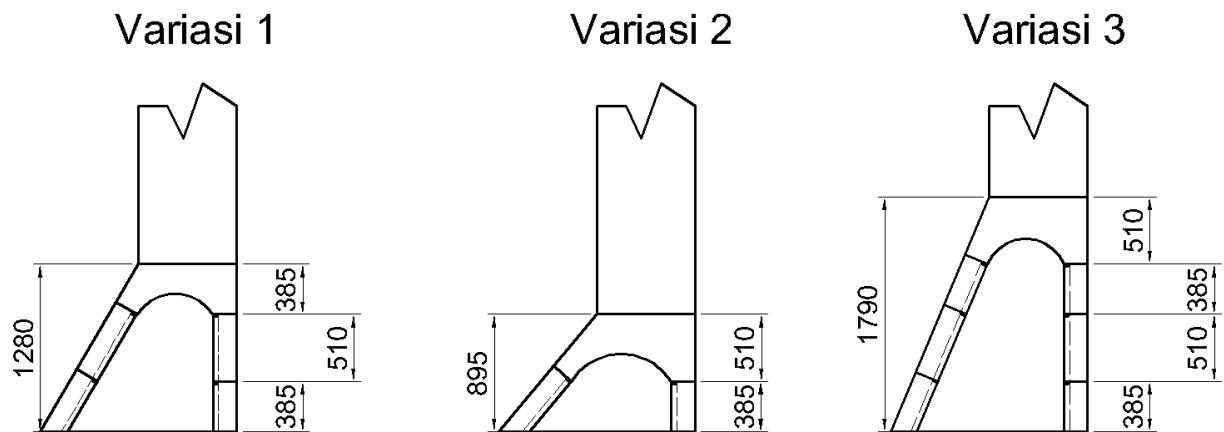
Sumber: PT XX, 2013

Tabel III.3 menunjukkan ukuran elemen sekat bergelombang kapal tanker 17500 LTDW, ukuran elemen didefinisikan sesuai dengan komponen ukuran elemen sekat bergelombang pada Sub-Bab II.1.1. Tebal pelat sekat diperoleh dari Gambar II.2 yang menunjukkan gambar sekat bergelombang secara keseluruhan. Ukuran lebar *web plate* dan sudut lekukan elemen juga tidak ditunjukkan pada Gambar III.5, maka diperlukan perhitungan sederhana untuk memperoleh ukuran tersebut.

### III.3. Penentuan Variasi

Dalam Tugas Akhir ini diperlukan pembuatan variasi untuk tinggi *lower stool* dan ketebalan diafragma atau penegar horizontal. Ada beberapa pertimbangan yang mendasari penentuan variasi model sekat bergelombang. Untuk jumlah variasi tinggi *lower stool* dan ketebalan diafragma ditentukan masing-masing sebanyak 3 macam, hal tersebut bertujuan untuk melihat *trend* dari hasil analisisnya yang akan terlihat bila minimal menggunakan 3 macam variasi. Variasi dari model terdiri dari 1 macam diambil dari data kapal dan 2 macam variasi diambil dari hasil perhitungan. Dari 3 variasi ketinggian *lower stool* dan 3 variasi ketebalan diafragma akan menghasilkan 9 model struktur yang akan dianalisis.

Variasi ketinggian *lower stool* ditentukan dengan dasar bahwa dimensi penegar vertikal maupun horizontal di dalam *lower stool* tidak berubah untuk setiap variasi model sehingga modulusnya juga akan memiliki nilai yang sama. Berdasarkan Sub-Bab II.2 modulus penegar untuk konstruksi *lower stool* ditentukan oleh jarak antar penegar, lebar efektif, dan beban pada penegar tersebut. Beban yang dialami oleh penegar berasal dari beban hidrostatik muatan yang merupakan fungsi jarak vertikal dari ujung atas pipa limbah sampai titik acuan pembebanan. Titik acuan pembebanan penegar diambil pada penegar horizontal terbawah sesuai data konstruksi *lower stool* karena dari data kapal yang didapat, seluruh penegar di dalam *lower stool* memiliki dimensi yang sama. Dengan demikian, untuk mendapatkan modulus penegar yang sama untuk setiap variasi maka jarak antar penegar dan lebar efektif penegar diambil sama seperti data konstruksi *lower stool* yang diperoleh. Dimensi variasi ketinggian *lower stool* dapat dilihat pada Gambar III.6.



Gambar III.6 Dimensi Variasi Tinggi *Lower Stool*

Gambar III.6 menunjukkan dimensi variasi ketinggian *lower stool* yang akan dianalisis pada Tugas Akhir ini. Variasi 1 memiliki tinggi 1280 mm merupakan tinggi *lower stool* dari data kapal tanker 17500 LTDW. Pada variasi 1 dipasang penegar horizontal sebanyak dua. Variasi 2 memiliki ukuran yang lebih kecil dari variasi 1 dengan tinggi *lower stool* 895 mm dan dipasang satu penegar horizontal. Variasi 3 memiliki ukuran yang terbesar dengan tinggi *lower stool* 1790 mm dan dipasang tiga penegar horizontal. Pada setiap variasi tinggi *lower stool* dipasang penegar; vertikal dan horizontal; yang memiliki modulus penampang yang sama dengan data kapal tanker 17500 LTDW.

Variasi ketebalan diafragma sekat ditentukan dengan pengurangan ketebalan dari pelat diafragma pada kapal tanker 17500 LTDW. Oleh karena itu, diafragma dimodelkan sebanyak 3 variasi dengan variasi pertama diambil data kapal yang diperoleh. Untuk 2 variasi lainnya diambil nilai ketebalan lebih kecil 10% dan 20% dari ketebalan diafragma kapal. Nilai ketebalan variasi menggunakan bilangan bulat tanpa angka pecahan dihitung dengan pembulatan ke atas untuk nilai pecahan 0.5 keatas dan pembulatan ke bawah untuk nilai pecahan dibawah 0.5. Variasi ketebalan diafragma sekat ditunjukkan pada Tabel III.4.

Tabel III.4 Variasi Ketebalan Diafragma Sekat

Variasi	Dasar Penentuan	Tebal Diafragma
1	Data kapal tanker 17500 LTDW	14 mm
2	10% dibawah data kapal	13 mm
3	20% dibawah data kapal	11 mm

Untuk setiap model dengan variasi ketinggian *lower stool* memiliki 3 ketebalan diafragma sekat yang berbeda. Dengan demikian, jumlah model yang dibuat dalam permasalahan Tugas Akhir ini sebanyak 9 model, yang dirangkum dalam Tabel III.5.

Tabel III.5 Variasi Model Sekat Bergelombang

Model	Nama	Tinggi <i>Lower Stool</i>	Tebal Diafragma
1	Model 1A	1280 mm	14 mm
	Model 1B		13 mm
	Model 1C		11 mm
2	Model 2A	895 mm	14 mm
	Model 2B		13 mm
	Model 2C		11 mm
3	Model 3A	1790 mm	14 mm
	Model 3B		13 mm
	Model 3C		11 mm

Pada Tabel III.5 setiap variasi tinggi *lower stool* diberi notasi 1; 2; dan 3, sedangkan untuk setiap variasi tebal diafragma sekat diberi notasi A; B; dan C. Pemberian notasi pada setiap variasi bertujuan untuk mempermudah identifikasi model dalam Tugas Akhir ini.

#### III.4. Pemodelan Sekat Bergelombang

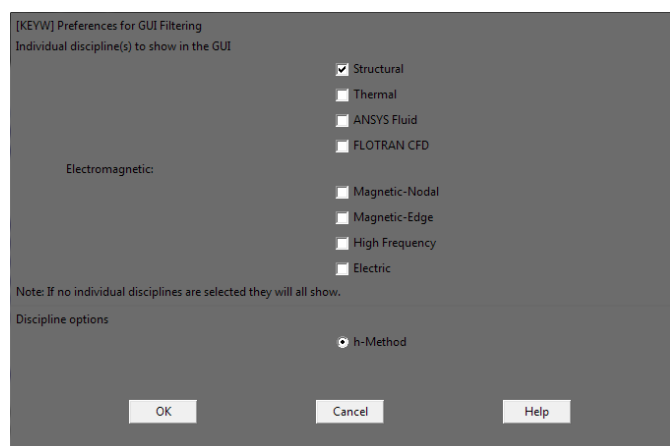
Pemodelan sekat bergelombang dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga. Penggunaan perangkat lunak berbasis elemen hingga akan memudahkan proses analisis struktur dengan menggunakan metode elemen hingga. Pemodelan menggunakan perangkat lunak memerlukan kapasitas perangkat yang memadai sehingga pembuatan model juga harus disesuaikan dengan kapasitas perangkat yang tersedia namun tidak mengurangi keakuratan model yang dibuat. Pembuatan model harus dibuat agar dapat mewakili kondisi sebenarnya sehingga proses analisis yang dilakukan dapat memberikan hasil yang sesuai dengan kondisi yang dialami struktur.

### III.4.1. Tahap *Pre-processor*

Berdasarkan Sub-Bab II.5 dijelaskan bahwa pemodelan struktur menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga terbagi atas tiga proses, yaitu *pre-processor*, *solver*, dan *post-processor*. Tahap *pre-processor* merupakan proses utama dalam pembuatan model sekat. Dalam perangkat lunak berbasis elemen hingga ini, proses tersebut dibagi menjadi beberapa tahapan, yaitu sebagai berikut:

a. Pemilihan tipe analisis

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini dipilih tipe analisis struktur.



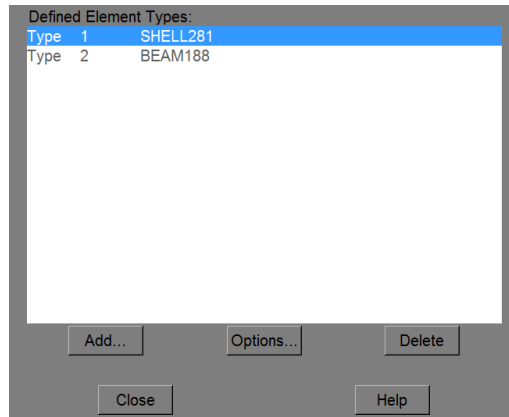
Gambar III.7 Pemilihan Tipe Analisis

b. Pemilihan dan penentuan tipe elemen

Tipe elemen yang dipilih disesuaikan dengan kebutuhan dalam pemodelan struktur. Dalam pemodelan sekat bergelombang terdapat dua tipe elemen yang dipilih, yaitu *shell281* dan *beam188*. Tipe elemen *beam188* dipilih untuk pemodelan dengan geometri garis, sedangkan tipe elemen *shell281* digunakan untuk model dengan geometri luas. Pemodelan dengan dua tipe elemen berbeda dilakukan agar model dapat menggambarkan kondisi struktur sebenarnya. Proses penentuan elemen ditunjukkan pada Gambar III.8.

Pemodelan sekat bergelombang lebih banyak menggunakan geometri luas. Hal tersebut dijelaskan dalam Sub-Bab II.7 bahwa analisis kekuatan sekat bergelombang dengan metode elemen hingga dilakukan menggunakan model pelat dengan geometri luas. Pemodelan dengan geometri luas dilakukan pada struktur pelat dari sekat dan *upper stool* serta *lower stool*. Oleh karena itu, *shell281* dipilih sebagai tipe elemen untuk model sekat bergelombang.



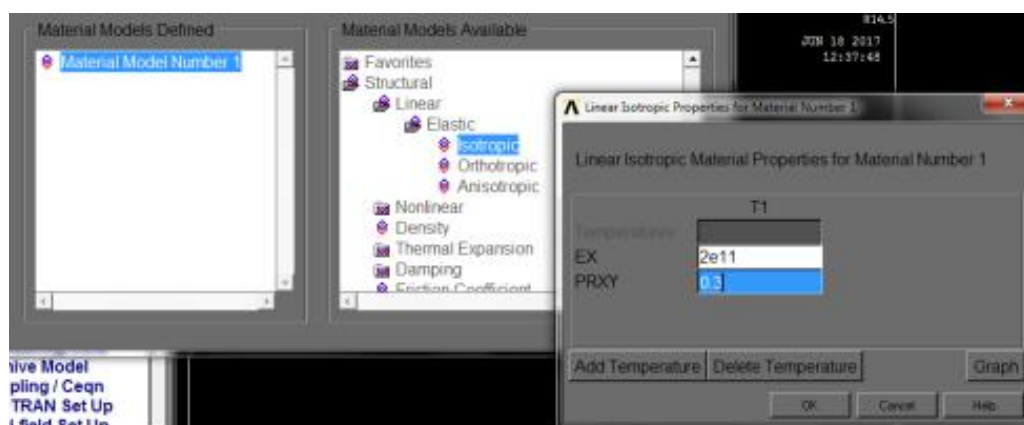


Gambar III.8 Penentuan Tipe Elemen

Pemilihan elemen *beam188* digunakan untuk membuat model penegar pada pelat diafragma di dalam konstruksi *lower stool*. Dalam Tabel III.2 menunjukkan konstruksi yang terpasang di dalam *lower stool*. Karena sistem konstruksi yang kompleks, maka model penegar pada diafragma *lower stool* dibuat dengan geometri garis. Hal tersebut dilakukan agar bentuk model dapat mewakili kondisi struktur sebenarnya.

c. Penentuan *material properties*

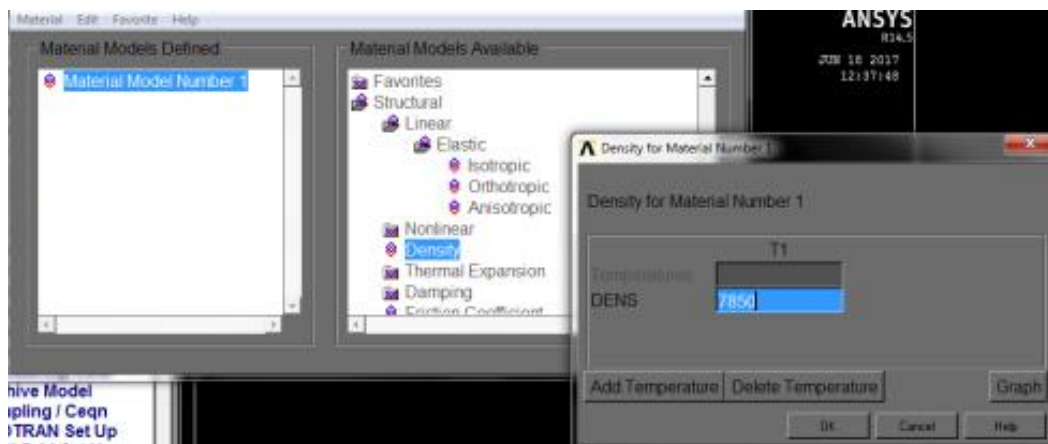
Tahapan ini menentukan sifat material dari model yang dibuat, sifat material yang ditentukan berupa *material model behavior*, modulus elastisitas, rasio Poisson, dan massa jenis material. *Material model behavior* dipilih untuk menentukan respon material dari model, untuk itu dipilih **Structural > Linier > Elastic > Isotropic**, seperti yang ditunjukkan pada Gambar III.9.



Gambar III.9 Penentuan *Material Properties*

Sifat material ditentukan berdasarkan sifat material dari baja yang digunakan pada kapal tanker 17500 LTDW, sesuai pada Sub-Bab II.8.1, material yang digunakan adalah baja *class II grade A* dengan data sifat-sifat material sebagai berikut:

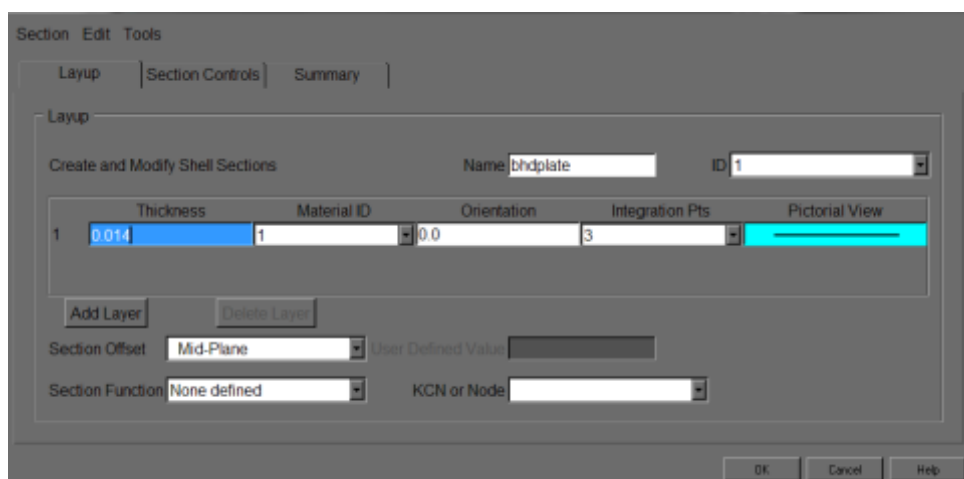
- Modulus Elastisitas atau Modulus Young (EX) sebesar 200 GPa atau  $2 \times 10^{11}$  Pa pada kolom ditulis dengan 2e11,
- Rasio Poisson (PRXY) sebesar 0.3,
- Massa jenis material (*Structural* > *Density* ditunjukkan pada Gambar III.10) sebesar  $7850 \text{ kg/m}^3$ .



Gambar III.10 Penentuan Massa Jenis Material

d. Penentuan *element section*

Model dengan geometri luas dibuat dari dimensi panjang dan lebar struktur, dan dari dimensi tersebut dapat dibentuk luasan yang menggambarkan bentuk struktur tanpa ketebalan. Nilai ketebalan struktur kemudian didefinisikan dalam *element section*. Penentuan *element section* ditunjukkan pada Gambar III.11.



Gambar III.11 Penentuan Ketebalan Elemen

Di dalam Sub-Bab III.2 dapat dilihat bahwa konstruksi sekat bergelombang terdiri dari pelat dengan berbagai macam ketebalan. Data ketebalan pelat dimasukkan ke dalam

*element section* untuk mendefinisikan ketebalan dari model struktur yang dibuat. Setiap komponen konstruksi didefinisikan secara individu untuk menghindari kesalahan dalam proses pembuatan model.

e. Pembuatan geometri model

Proses pembuatan geometri model menggunakan perangkat lunak ini harus dilakukan secara bertahap dimulai dari titik (*keypoints*), dari titik-titik tersebut disambung yang kemudian membentuk garis (*lines*), kemudian garis-garis disambung menjadi luasan (*areas*), dan gabungan beberapa luasan akan membentuk volume. Untuk tahap pembuatan geometri luas, proses pembuatan berhenti sampai garis-garis yang disambung membentuk sebuah luasan dari struktur.

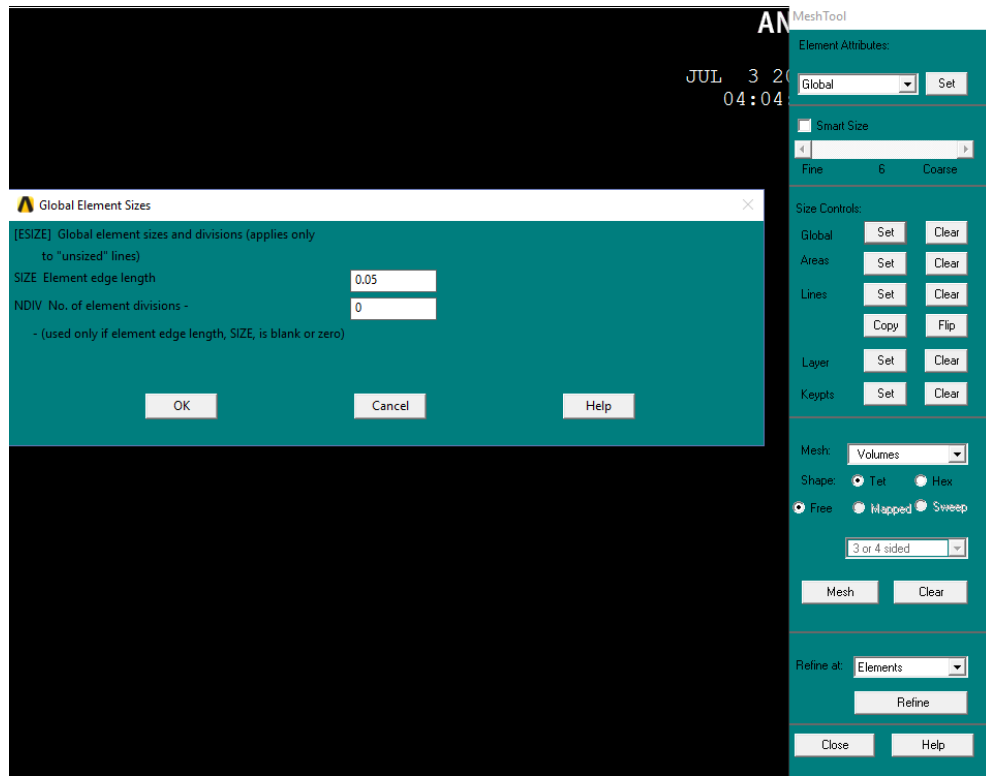
Dalam proses pembuatan model harus dipastikan setiap komponen konstruksi tersambung antara satu dengan lainnya, meskipun memiliki geometri yang berbeda. Sebagai contoh adalah penegar diafragma dalam *lower stool* memiliki geometri garis tetap harus menyambung dengan pelat diafragma *lower stool* yang memiliki geometri luas. Sambungan antara geometri garis dan luasan adalah garis yang bersinggungan (*intersects*), dengan demikian pada pertemuan antara kedua geometri tersebut harus terdapat potongan luasan. Hal ini dilakukan agar dalam proses analisis menggunakan metode elemen hingga, kedua geometri dapat dianalisis secara gabungan dan tidak terpisah.

f. *Meshing*

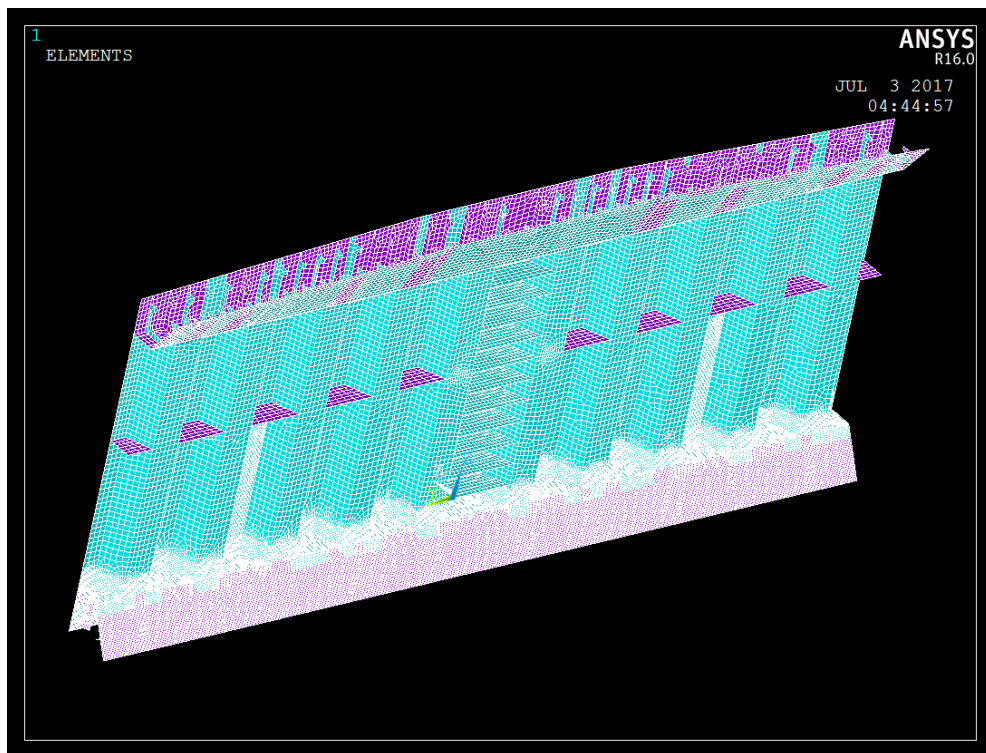
Proses *meshing* dilakukan setelah pembuatan geometri model selesai. Pada tahap ini model dibagi menjadi elemen-elemen yang lebih kecil untuk selanjutnya dianalisis menggunakan metode elemen hingga. Ukuran *meshing* model menentukan keakuratan hasil analisis menggunakan metode elemen hingga. Dalam proses *meshing* struktur sekat bergelombang menggunakan bentuk *meshing quadrilateral* (segi empat) untuk geometri luasan. Penentuan ukuran *mesh* dapat dilihat pada Gambar III.12.

Pada pemodelan sekat bergelombang proses *meshing* dilakukan dengan menentukan ukuran *mesh*, kemudian pembagian elemen akan dilakukan secara otomatis oleh perangkat lunak. Sesuai dengan Sub-Bab II.7 minimal ukuran *meshing* untuk pelat sekat bergelombang adalah maksimal sesuai dengan jarak penegar di dalam *stool*,

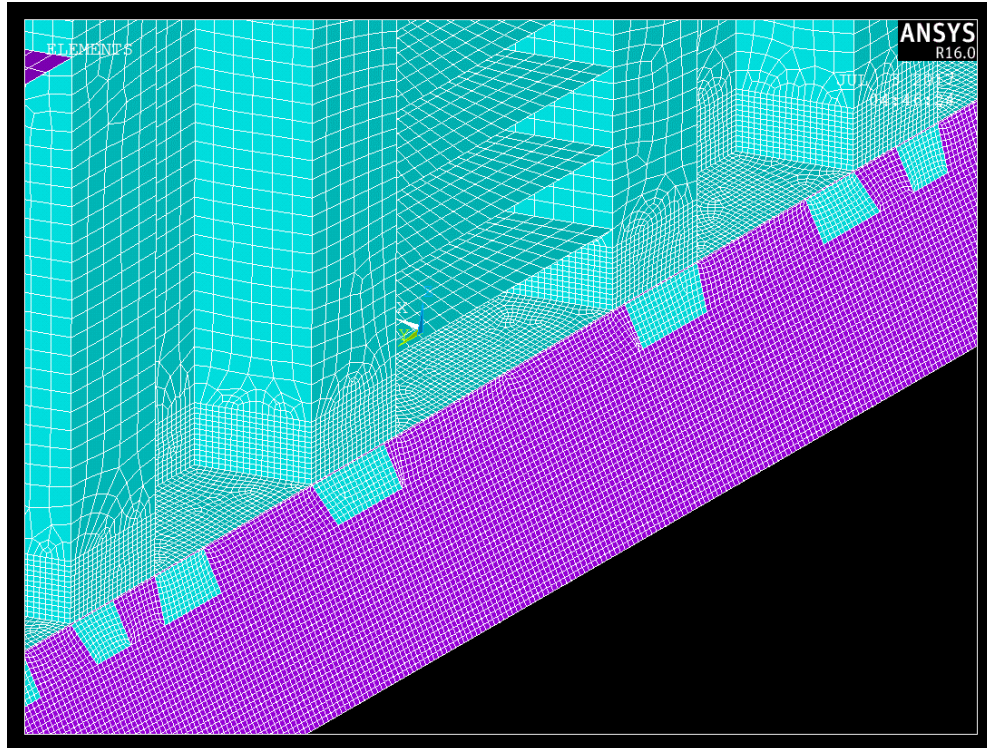
yaitu 385 mm atau 0.385 m. Hasil pembuatan *mesh* ditunjukkan pada Gambar III.13 dan Gambar III.14.



Gambar III.12 Penentuan Ukuran *Mesh* Pada Model



Gambar III.13 Hasil *Mesh* Sekat Bergelombang



Gambar III.14 Hasil *Mesh* Pada *Fine Mesh Zone*

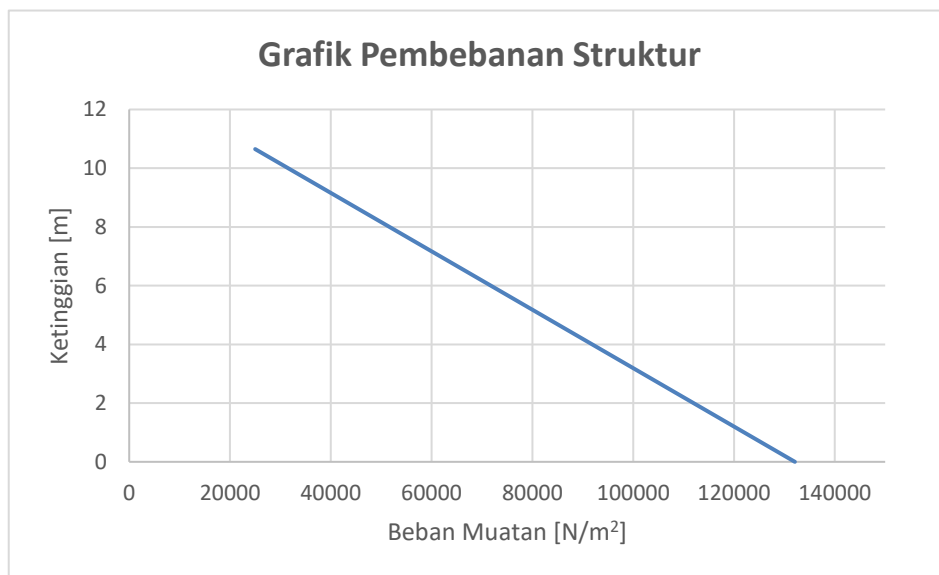
Pada pemodelan sekat bergelombang terdapat *fine mesh zone* yang dijelaskan dalam Sub-Bab II.8.2, yang merupakan bagian dari sekat bergelombang yang harus dianalisis dengan lebih akurat sehingga ukuran *meshing* model pada bagian tersebut lebih kecil pada bagian lainnya. Pada sekat bergelombang, bagian tersebut berada di sambungan antara pelat sekat bergelombang dengan *lower stool*. Oleh karena itu, di sekitar bagian tersebut minimal ukuran *meshing* menjadi 50 x 50 mm atau 0.05 x 0.05 m. Pada Gambar III.13 dan Gambar III.14 secara berurutan menunjukkan hasil *mesh* pada sekat bergelombang secara keseluruhan dan pada *fine mesh zone*. Ukuran elemen yang terbentuk pada *fine mesh zone* terlihat lebih kecil dari sekitarnya karena ukuran *mesh* yang lebih kecil.

g. Aplikasi beban

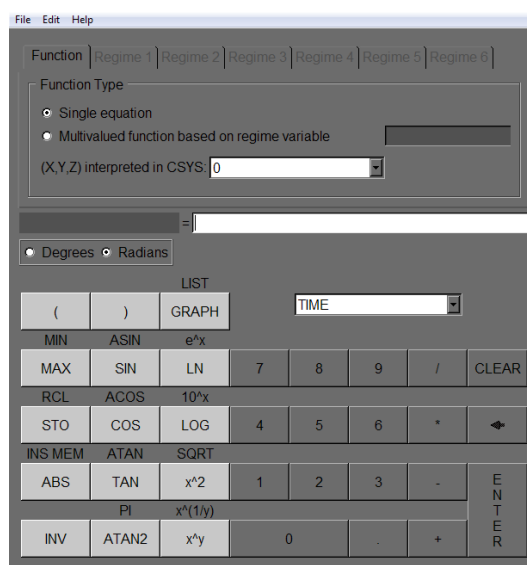
Untuk melakukan analisis kekuatan menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga, pembebanan yang dialami struktur harus diaplikasikan ke model. Pembebanan harus diaplikasikan sesuai dengan kondisi yang dialami struktur. Dalam Tugas Akhir ini, pembebanan menggunakan beban statis akibat muatan yang merupakan beban hidrostatik. Perhitungan nilai beban pada struktur sekat dihitung sesuai dengan persamaan II.2, II.3, dan II.4 yang merupakan fungsi jarak vertikal antara ujung atas

pipa limbah sampai ke titik acuan pembebanan. Yang berarti semakin dekat jarak titik acuan pembebanan ke ujung atas pipa limbah, maka nilai beban akan semakin kecil.

Berdasarkan Sub-Bab II.4 pembebanan yang menggunakan beban hidrostatik menyebabkan struktur mengalami pembebanan secara merata dengan bentuk trapesium. Dengan demikian, nilai beban tidak sama dari bagian dasar tangki sampai bagian ujung atas tangki sehingga diperlukan perhitungan untuk menentukan persamaan beban hidrostatik. Penentuan persamaan beban menggunakan tiga titik acuan. Hasil perhitungan beban hidrostatik digambarkan pada Gambar III.15.



Gambar III.15 Grafik Beban Statis Akibat Muatan

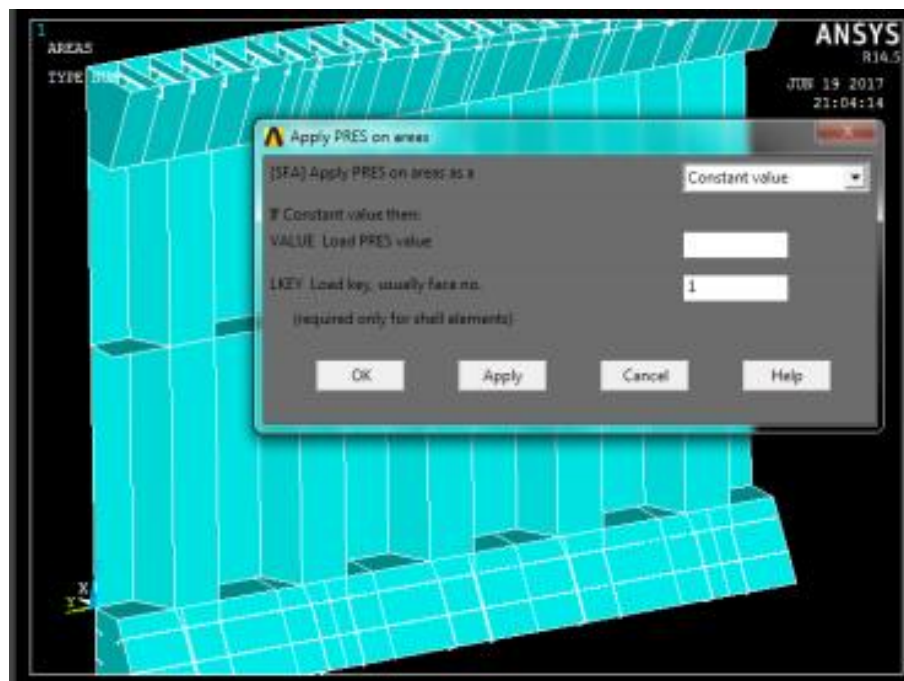


Gambar III.16 Pembuatan Fungsi Beban



Gambar III.15 menunjukkan beban hidrostatik yang dialami sekat bergelombang. Dari grafik tersebut dapat ditemukan persamaan beban untuk menentukan nilai beban untuk setiap ketinggian. Persamaan beban didapatkan sebesar  $P = -10055.250Z + 132088.413$ , dengan  $P$  adalah nilai beban dalam  $N/m^2$ ; dan  $Z$  adalah ketinggian dari alas ganda dihitung dalam m. Untuk mengaplikasikan persamaan beban, dilakukan pembuatan fungsi pada kolom parameter, seperti terlihat pada Gambar III.16. Setelah fungsi dibuat maka beban dapat diaplikasikan dengan bentuk persamaan.

Beban diaplikasikan ke model sekat menggunakan beban *pressure* untuk pembebanan pada geometri luasan. Kemudian persamaan beban hidrostatik dimasukkan sebagai nilai beban model. Aplikasi beban pada model ditunjukkan pada Gambar III.17.

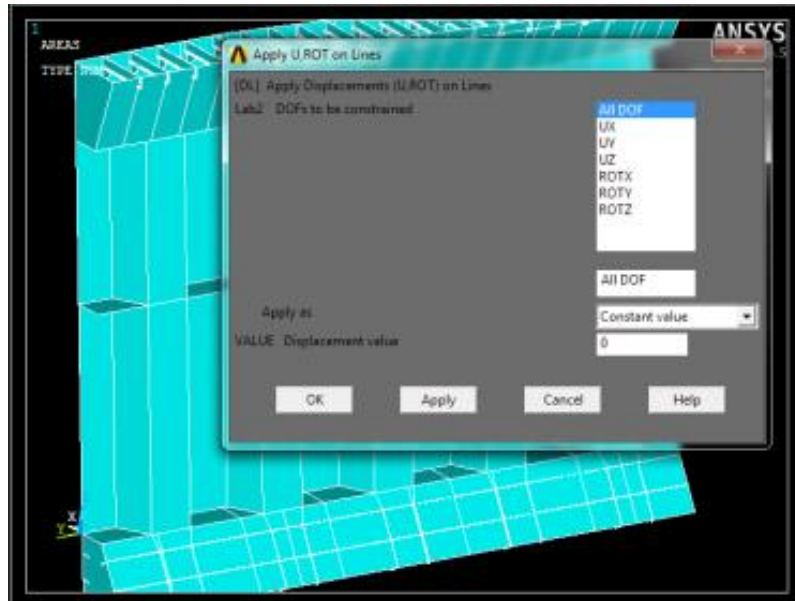


Gambar III.17 Aplikasi Beban *Pressure* ke Model Sekat Bergelombang

#### h. Aplikasi kondisi batas

Kondisi batas diaplikasikan agar kondisi sebenarnya yang dialami struktur dapat disimulasikan pada model. Kondisi batas yang diaplikasikan berupa tumpuan pada ujung model yang membatasi derajat kebebasan model (*degree of freedom*). Terdapat 6 jenis derajat kebebasan model, yaitu displamen pada sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z; serta rotasi pada sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z. Aplikasi kondisi batas pada model harus benar-benar diperhatikan agar kondisi yang disimulasikan model dapat

mewakili kondisi struktur sebenarnya. Proses aplikasi kondisi batas pada model ditunjukkan pada Gambar III.18.



Gambar III.18 Aplikasi Kondisi Batas ke Model Sekat Bergelombang

Kondisi batas diaplikasikan dengan acuan sumbu pada model struktur, yang terdiri dari 3 sumbu, yaitu sebagai berikut:

1. sumbu X searah dengan lebar kapal;
2. sumbu Y searah dengan panjang kapal; dan
3. sumbu Z searah dengan tinggi kapal.

Kondisi batas diaplikasikan pada geometri garis pada sambungan antara sekat bergelombang dengan *wing tank*, sekat memanjang *centerline*, geladak, dan alas ganda. Proses ini dilakukan dengan cara memberi nilai 0 (nol) pada derajat kebebasan yang akan dibatasi.

#### III.4.2. Tahap *Solver*

Tahap *solver* merupakan tahap perhitungan dalam proses analisis menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga. Tahap *solver* dibagi menjadi tiga proses, yaitu pemindahan beban dan kondisi batas dari geometri ke elemen-elemen hasil proses *meshing*; dan proses perhitungan komputasi dari model yang telah disimulasikan. Tahap perhitungan komputasi (*solution*) dapat dilakukan dengan memilih ***Solution > Solve > Current LS > OK***.



### III.4.3. Tahap *Post-processor*

Pada tahap ini, model yang telah dianalisis dengan perhitungan komputasi dapat dilihat hasil dari perhitungannya dalam bentuk grafis. Bentuk grafis yang ditampilkan menjelaskan respon yang diberikan model terhadap kondisi batas dan pembebanan yang diberikan. Beberapa data yang dapat diperoleh pada tahap ini antara lain:

1. Tegangan (*stress*) yang dialami model,
2. Deformasi yang terjadi,
3. Displasmen model (perpindahan),
4. Lokasi terjadinya tegangan maksimum dan minimum, dan lain-lain.

Dalam penampilan hasil perhitungan untuk tegangan yang dialami model terdapat beberapa kriteria yang dapat dipilih. Pada pemodelan sekat bergelombang dipilih kriteria kriteria tegangan von mises. Pemilihan kriteria ini didasari oleh penjelasan pada Sub-Bab II.10 yang menjelaskan bahwa kriteria tegangan yang diijinkan pada model struktur dihitung berdasarkan tegangan von mises pada tiap *node*.

### III.5. Konvergensi Model Sekat Bergelombang

Dalam pemodelan sekat bergelombang pada Tugas Akhir ini, proses konvergensi dilakukan untuk 3 model dengan variasi ketinggian *lower stool*. Untuk model dengan variasi ketebalan diafragma tidak diperlukan proses konvergensi karena diafragma dimodelkan dengan geometri luasan dan ketebalannya didefinisikan menggunakan *elemen section* sehingga perubahan ketebalan tidak berpengaruh pada geometri model. Hal tersebut menyebabkan perubahan ketebalan tidak mempengaruhi hasil *mesh* pada model sekat.

Proses konvergensi pada model sekat bergelombang meningkatkan keakuratan hasil analisis kekuatan. Proses konvergensi dilakukan dengan cara mengubah ukuran *mesh* pada model sekat menjadi ukuran yang lebih kecil. Perubahan ukuran *mesh* akan menyebabkan hasil pada proses *solver* model sekat berubah. Nilai tegangan pada model struktur sekat bergelombang dapat meningkat ataupun berkurang seiring dengan perubahan ukuran *mesh* yang semakin kecil. Proses konvergensi dilakukan terus menerus sampai nilai tegangan tidak berubah atau konstan. Saat kondisi tersebut berarti model sekat telah mewakili kondisi sekat bergelombang sebenarnya.

Proses konvergensi pada model sekat bergelombang dilakukan dengan acuan jumlah elemen pada model sekat. Hal tersebut dilakukan karena ukuran *mesh* pada model berbeda-

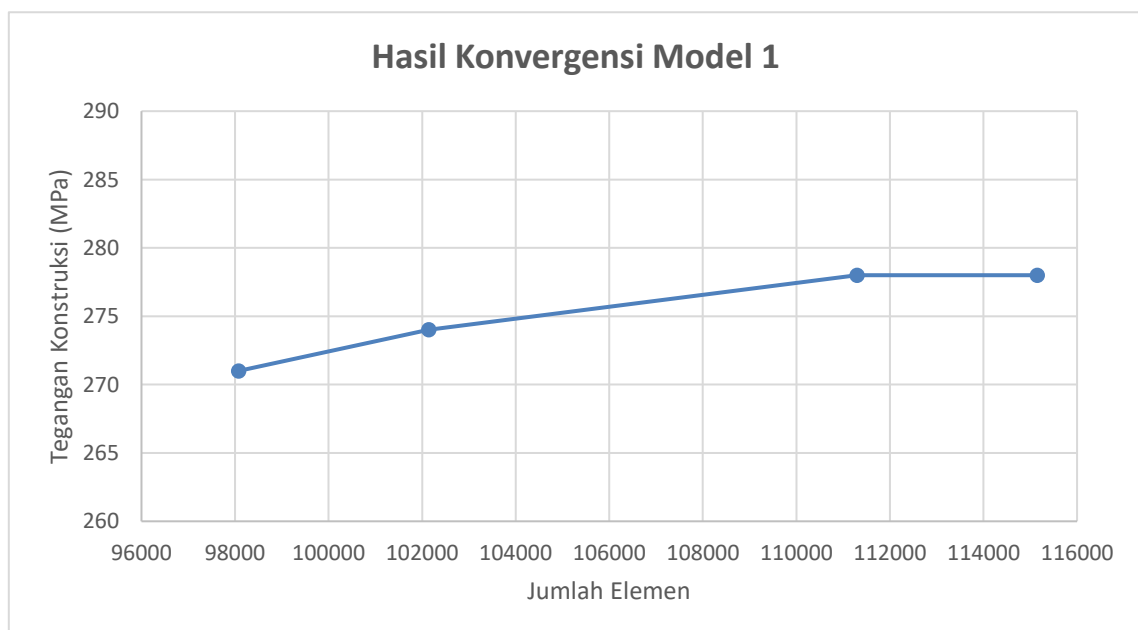
beda sehingga tidak dapat menggunakan ukuran *mesh* sebagai acuan dalam proses konvergensi. Saat nilai tegangan sudah tidak berubah atau kondisi dimana model sudah mewakili kondisi struktur sebenarnya, ukuran *mesh* pada model saat kondisi tersebut digunakan sebagai acuan dalam proses simulasi untuk variasi ketebalan diafragma.

### III.5.1. Konvergensi Model 1

Konvergensi pada Model 1 dilakukan dengan empat kali perubahan jumlah elemen. Ukuran *mesh* pada Model 1 menggunakan dua jenis ukuran, dua jenis ukuran tersebut digunakan pada bagian-bagian berikut ini:

1. Ukuran I digunakan pada konstruksi *lower stool* yang meliputi pelat sisi, pelat atas, pelat diafragma, penegar vertikal dan horizontal, dan penegar diafragma *lower stool*, braket sambungan antara *lower stool* dengan sekat, serta pada pelat sekat bergelombang dalam daerah 500 mm di atas sambungan antara *lower stool* dengan sekat;
2. Ukuran II digunakan pada konstruksi *upper stool* yang meliputi pelat sisi, pelat bawah, dan penegar *upper stool*, pelat diafragma sekat, serta pelat sekat bergelombang diluar daerah 500 mm di atas sambungan antara *lower stool* dengan sekat.

Hasil konvergensi Model 1 ditunjukkan pada Gambar III.19 dan hasilnya dirangkum pada Tabel III.6.



Gambar III.19 Grafik Hasil Konvergensi Model 1

Tabel III.6 Proses Konvergensi Model 1

Proses Konvergensi				
No	Jenis Ukuran <i>Mesh</i>	Ukuran <i>Mesh</i> (mm)	Jumlah Elemen	Nilai Tegangan Konstruksi (MPa)
1	Ukuran I	50 x 50	98077	271
	Ukuran II	200 x 200		
2	Ukuran I	47.5 x 47.5	102142	274
	Ukuran II	175 x 175		
3	Ukuran I	46.5 x 46.5	111298	278
	Ukuran II	165 x 165		
4	Ukuran I	45 x 45	115145	278
	Ukuran II	150 x 150		

Rincian tahapan dalam proses konvergensi dapat dilihat pada Tabel III.6. Grafik hasil proses konvergensi ditunjukkan pada Gambar III.19. Seperti yang terlihat pada Tabel III.6 tegangan bernilai konstan dengan perubahan jumlah elemen pada saat jumlah elemen 115145 dengan ukuran *mesh*, ukuran I 45 x 45 mm; dan ukuran II 150 x 150 mm.

### III.5.2. Konvergensi Model 2

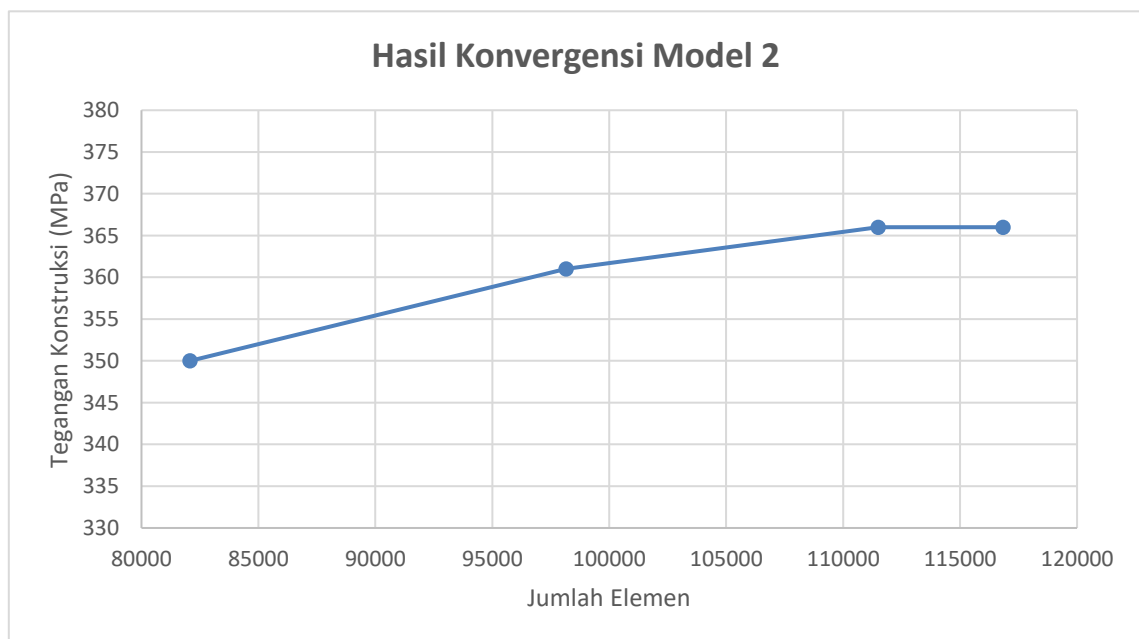
Konvergensi pada Model 2 dilakukan dengan empat kali perubahan jumlah elemen. Ukuran *mesh* pada Model 2 menggunakan dua jenis ukuran, dua jenis ukuran tersebut digunakan pada bagian-bagian berikut ini:

1. Ukuran I digunakan pada konstruksi *lower stool* yang meliputi pelat sisi, pelat atas, pelat diafragma, penegar vertikal dan horizontal, dan penegar diafragma *lower stool*, braket sambungan antara *lower stool* dengan sekat, serta pada pelat sekat bergelombang dalam daerah 500 mm di atas sambungan antara *lower stool* dengan sekat;
2. Ukuran II digunakan pada konstruksi *upper stool* yang meliputi pelat sisi, pelat bawah, dan penegar *upper stool*, pelat diafragma sekat, serta pelat sekat bergelombang diluar daerah 500 mm di atas sambungan antara *lower stool* dengan sekat.

Hasil konvergensi Model 2 ditunjukkan pada Gambar III.20 dan hasilnya dirangkum pada Tabel III.7.

Tabel III.7 Proses Konvergensi Model 2

Proses Konvergensi				
No	Jenis Ukuran <i>Mesh</i>	Ukuran <i>Mesh</i> (mm)	Jumlah Elemen	Nilai Tegangan Konstruksi (MPa)
1	Ukuran I	50 x 50	82072	350
	Ukuran II	200 x 200		
2	Ukuran I	45 x 45	98157	361
	Ukuran II	150 x 150		
3	Ukuran I	43 x 43	111497	366
	Ukuran II	130 x 130		
4	Ukuran I	42.5 x 42.5	116826	366
	Ukuran II	125 x 125		



Gambar III.20 Grafik Hasil Konvergensi Model 2

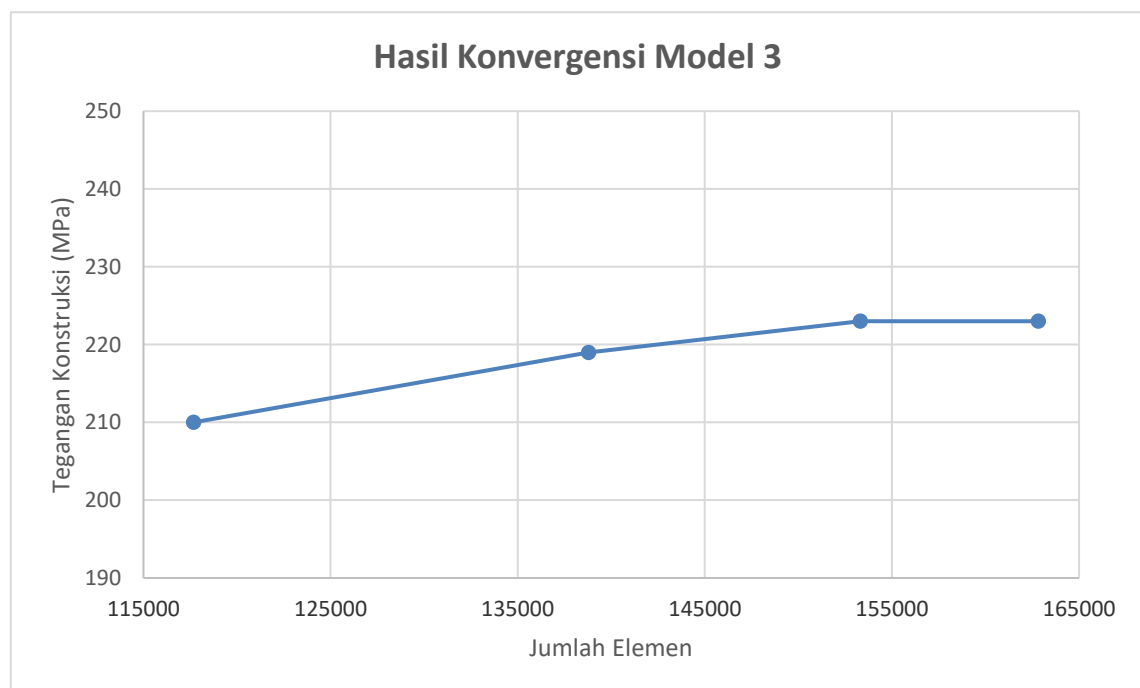
Rincian tahapan dalam proses konvergensi dapat dilihat pada Tabel III.7. Grafik hasil proses konvergensi ditunjukkan pada Gambar III.20. Seperti yang terlihat pada Tabel III.7 tegangan bernilai konstan dengan perubahan jumlah elemen pada saat jumlah elemen 116826 dengan ukuran *mesh*, ukuran I 42.5 x 42.5 mm; dan ukuran II 125 x 125 mm.

### III.5.3. Konvergensi Model 3

Konvergensi pada Model 3 dilakukan dengan empat kali perubahan jumlah elemen. Ukuran *mesh* pada Model 3 menggunakan dua jenis ukuran, dua jenis ukuran tersebut digunakan pada bagian-bagian berikut ini:

1. Ukuran I digunakan pada konstruksi *lower stool* yang meliputi pelat sisi, pelat atas, pelat diafragma, penegar vertikal dan horizontal, dan penegar diafragma *lower stool*, braket sambungan antara *lower stool* dengan sekat, serta pada pelat sekat bergelombang dalam daerah 500 mm di atas sambungan antara *lower stool* dengan sekat;
2. Ukuran II digunakan pada konstruksi *upper stool* yang meliputi pelat sisi, pelat bawah, dan penegar *upper stool*, pelat diafragma sekat, serta pelat sekat bergelombang diluar daerah 500 mm di atas sambungan antara *lower stool* dengan sekat.

Hasil konvergensi Model 3 ditunjukkan pada Gambar III.21 dan hasilnya dirangkum pada Tabel III.8.



Gambar III.21 Grafik Hasil Konvergensi Model 3

Tabel III.8 Proses Konvergensi Model 3

Proses Konvergensi				
No	Jenis Ukuran <i>Mesh</i>	Ukuran <i>Mesh</i> (mm)	Jumlah Elemen	Nilai Tegangan Konstruksi (MPa)
1	Ukuran I	50 x 50	117675	210
	Ukuran II	200 x 200		
2	Ukuran I	45 x 45	138782	219
	Ukuran II	150 x 150		
3	Ukuran I	43 x 43	153309	223
	Ukuran II	130 x 130		
4	Ukuran I	42.5 x 42.5	162813	223
	Ukuran II	125 x 125		

Rincian tahapan dalam proses konvergensi dapat dilihat pada Tabel III.8. Grafik hasil proses konvergensi ditunjukkan pada Gambar III.21. Seperti yang terlihat pada Tabel III.8 tegangan bernilai konstan dengan perubahan jumlah elemen pada saat jumlah elemen 162813 dengan ukuran *mesh*, ukuran I 42.5 x 42.5 mm; dan ukuran II 125 x 125 mm.

### III.6. Penentuan Kondisi Batas Model

Penentuan kondisi batas dilakukan dengan melakukan simulasi pada Model 1A, yang merupakan model dengan variasi ukuran sesuai dengan data kapal yang didapat. Simulasi dilakukan dengan beberapa variasi kondisi batas, dan variasi kondisi batas yang diaplikasikan pada model tersebut diubah sampai diperoleh nilai *yield utilisation factor* untuk Model 1A memenuhi nilai yang diijinkan, dan nilai tegangan maksimum yang terjadi pada model dipilih yang terkecil. Model 1A diambil sebagai acuan karena ukuran konstruksi pada model tersebut diperoleh dari data kapal tanker 17500 LTDW sehingga nilai *yield utilisation factor* pasti memenuhi nilai yang diijinkan.

Rincian hasil simulasi model untuk mendapatkan kondisi batas yang sesuai ditunjukkan pada Tabel III.9. Kondisi batas yang ditunjukkan dalam Tabel III.9 diaplikasikan pada geometri garis model dengan posisi sebagai berikut:

1. Sambungan antara sekat bergelombang dan alas ganda;
2. Sambungan antara sekat bergelombang dan geladak utama;
3. Sambungan antara sekat bergelombang dan *wing tank*;
4. Sambungan antara sekat bergelombang dan sekat memanjang *centerline*.

Tabel III.9 Hasil Uji Coba Simulasi Dengan Variasi Kondisi Batas Pada Model 1A

Variasi	I				II				III			
Kondisi Batas	Posisi Kondisi Batas											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Ux	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
Uy	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
Uz	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
Rotx	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
Roty	√	√	√	√	-	-	-	-	-	-	-	-
Rotz	√	√	√	√	-	-	-	-	√	√	√	√
σmaks	256 MPa				258 MPa				254 MPa			
Variasi	IV				V				VI			
Kondisi Batas	Posisi Kondisi Batas											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Ux	√	√	√	√	√	√	-	-	√	√	-	-
Uy	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
Uz	√	√	√	√	√	√	√	√	√	-	√	√
Rotx	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
Roty	-	-	√	-	-	-	√	-	-	-	√	-
Rotz	√	√	√	-	√	√	√	-	√	√	√	-
σmaks	254 MPa				243 MPa				278 MPa			

Dalam hasil uji coba simulasi model untuk menentukan kondisi batas harus dilihat juga lokasi terjadinya tegangan maksimum, karena terkait dengan *fine mesh zone* yang telah dijelaskan pada Sub-Bab II.7. Dari hasil uji coba simulasi juga diperoleh data berupa lokasi terjadinya tegangan maksimum yang ditunjukkan pada Tabel III.10.

Tabel III.10 Lokasi Tegangan Maksimum Saat Uji Coba Simulasi

Variasi	Lokasi Tegangan Maksimum
I	Sambungan antara diafragma sekat dan <i>wing tank</i>
II	Sambungan antara diafragma sekat dan <i>wing tank</i>
III	Sambungan antara diafragma sekat dan <i>wing tank</i>
IV	Sambungan antara diafragma sekat dan <i>wing tank</i>
V	Sambungan antara diafragma sekat an <i>wing tank</i>
VI	Sambungan antara sekat bergelombang dan <i>lower stool</i>

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel III.10, pada tahap I; II; III; IV; dan V tegangan maksimum terjadi pada sambungan antara diafragma sekat dan pelat *wing tank*. Pada lokasi tersebut nilai *yield utilisation factor* yang diijinkan adalah kurang dari 0.64 atau dengan tegangan maksimum kurang dari 150.4 MPa sehingga dengan kondisi batas tersebut nilai tegangan maksimum model melebihi nilai yang diijinkan. Pada tahap VI tegangan maksimum terjadi pada sambungan antara sekat bergelombang dengan pelat atas *lower stool*. Lokasi tersebut termasuk dalam *fine mesh zone* dengan nilai *yield utilisation factor* yang diijinkan adalah kurang dari 1.2 atau dengan nilai tegangan maksimum kurang dari 282 MPa sehingga dengan kondisi batas tersebut nilai tegangan maksimum model dibawah nilai yang diijinkan. Dengan demikian, kondisi batas yang diambil adalah kondisi batas pada tahap VI.

### III.7. Perhitungan Berat Konstruksi Model Sekat Bergelombang

Perhitungan berat konstruksi dilakukan secara komputasi dengan bantuan perangkat lunak berbasis elemen hingga. Dalam perangkat lunak tersebut, berat konstruksi model dihitung berdasarkan massa jenis material yang didefinisikan pada model tersebut. Massa jenis material didefinisikan pada tahap *pre-processor* sesuai yang dijelaskan pada Sub-Bab sebelumnya. Dari massa jenis material tersebut, kemudian perangkat lunak menghitung berat konstruksi dalam tahap *solver* untuk setiap elemen yang dibuat pada model sekat bergelombang. Perhitungan berat konstruksi dilakukan bersamaan dengan perhitungan komputasi untuk kekuatan model dengan tampilan seperti pada Gambar III.22.



```

***** PRECISE MASS SUMMARY *****

TOTAL RIGID BODY MASS MATRIX ABOUT ORIGIN
      Translational mass
      62110.      0.0000      0.0000
      0.0000      62110.      0.0000
      0.0000      0.0000      62110.
-----
      Coupled translational/rotational mass
      0.0000      0.23606E+06      28785.
      -0.23606E+06      0.0000      -7.6702
      -28785.      7.6702      0.0000
-----
      Rotational mass (inertia)
      0.16206E+07      -4.3167      1.2963
      -4.3167      0.46656E+07      0.10312E+06
      1.2963      0.10312E+06      0.30942E+07

TOTAL MASS = 62110.
The mass principal axes coincide with the global Cartesian axes

CENTER OF MASS (X,Y,Z)= -0.12349E-03 -0.46345 3.8007

TOTAL INERTIA ABOUT CENTER OF MASS
      0.71008E+06 -0.76188 -27.856
      -0.76188 0.37685E+07 -6278.9
      -27.856 -6278.9 0.30809E+07

PRINCIPAL INERTIAS = 0.71008E+06 0.37685E+07 0.30808E+07
ORIENTATION VECTORS OF THE INERTIA PRINCIPAL AXES IN GLOBAL CARTESIAN
( 1.000, 0.000, 0.000) (-0.000, 1.000,-0.009) (-0.000, 0.009, 1.000)

*** MASS SUMMARY BY ELEMENT TYPE ***

TYPE      MASS
2      61793.2
3      316.981

```

Gambar III.22 Ilustrasi Hasil Perhitungan Berat Konstruksi Pada Model Sekat Bergelombang

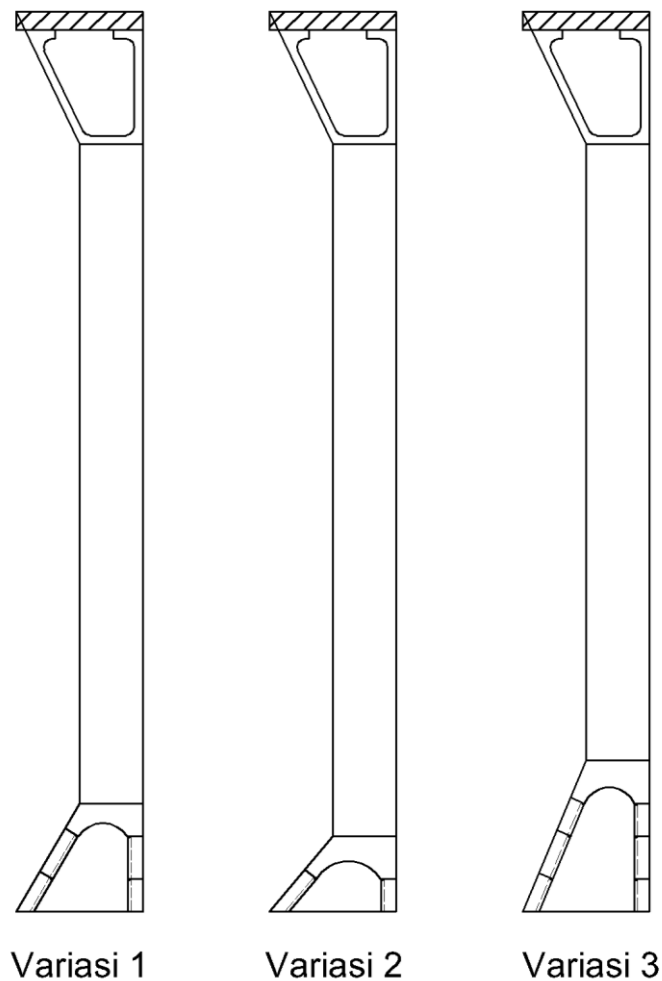
### III.8. Perhitungan Volume Tangki Muat

Perhitungan volume tangki muat bertujuan untuk mengetahui desain variasi yang optimal. Perhitungan dilakukan dari pendekatan perhitungan luasan penampang tangki yang hilang akibat pemasangan konstruksi *stool* pada sekat bergelombang. Luasan memanjang tangki muat yang hilang akibat pemasangan *upper stool* dan *lower stool* didapatkan dengan cara menghitung luasan penampang dari kedua konstruksi *stool* yang dipasang pada sekat bergelombang. Dari perhitungan luas penampang konstruksi *upper stool* dan *lower stool*, kemudian dikalikan dengan lebar dari konstruksi *stool* dalam tangki muat sehingga ditemukan volume yang hilang dari dalam tangki muat.

Perhitungan luas penampang hanya dilakukan pada konstruksi *upper stool* dan *lower stool* dengan mengabaikan luas penampang dari sekat bergelombang dan diafragma sekat. Luas penampang sekat bergelombang tidak masuk dalam perhitungan karena bentuk konstruksi sekat bergelombang yang berlekuk-lekuk membuat konstruksi sekat tidak mengurangi volume tangki muat.

Konstruksi diafragma sekat termasuk aspek yang dihitung. Perhitungan volume diafragma sekat dihitung menggunakan luasan penampang pelat diafragma sekat seperti yang

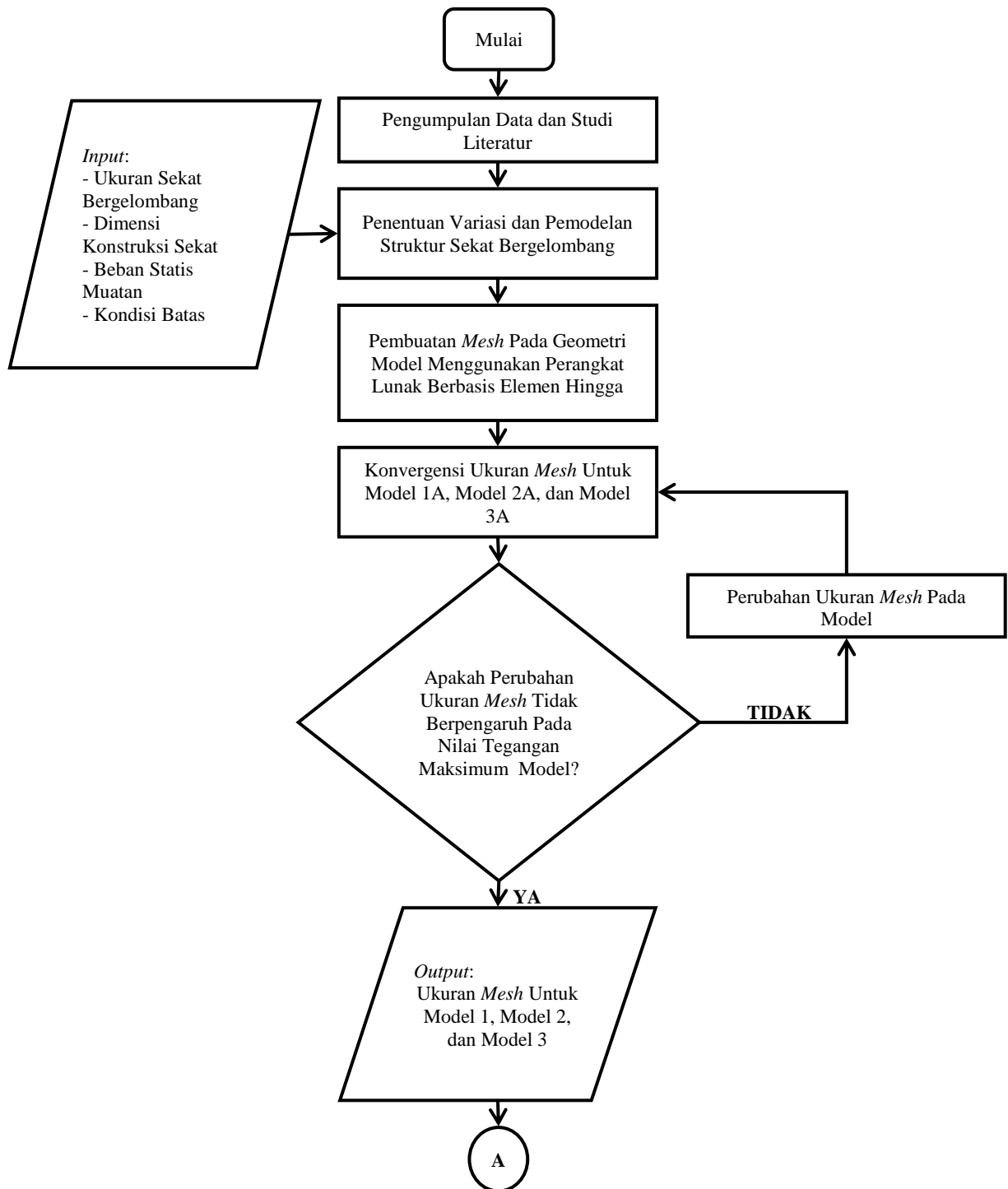
ditunjukkan pada Gambar III.23. Dari perhitungan luasan kemudian hasil yang didapat dikalikan dengan ketebalan diafragma sekat untuk setiap variasinya.

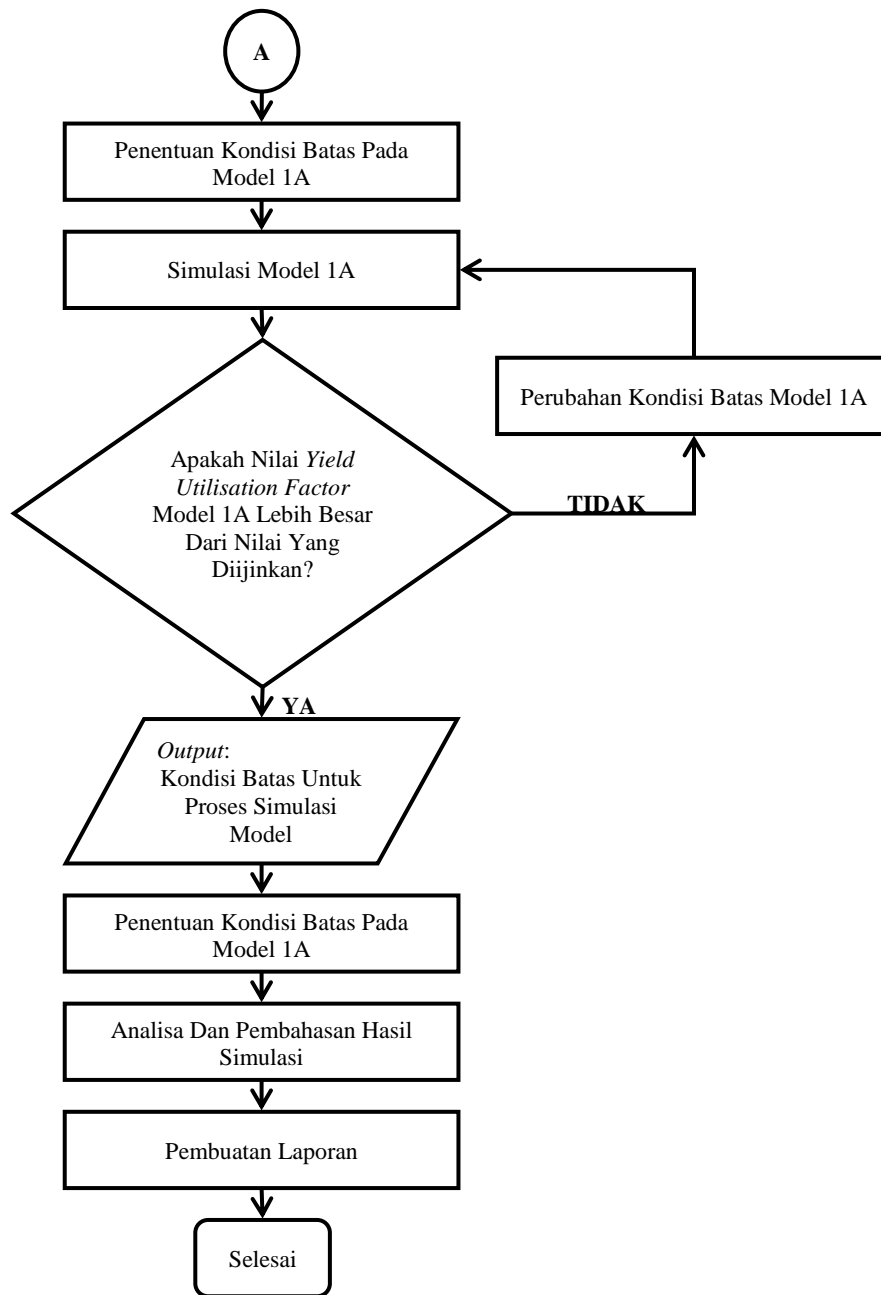


Gambar III.23 Penampang Konstruksi Sekat Bergelombang

### III.9. Bagan Alir

Bagan alir menjelaskan proses pengerjaan Tugas Akhir ini secara keseluruhan. Bagan alir berisi rangkuman dari metodologi pengerjaan Tugas Akhir hingga proses penyelesaian permasalahannya. Bagan alir pengerjaan Tugas Akhir ini ditunjukkan pada Gambar III.24





Gambar III.24 Bagan Alir Pengerjaan Tugas Akhir

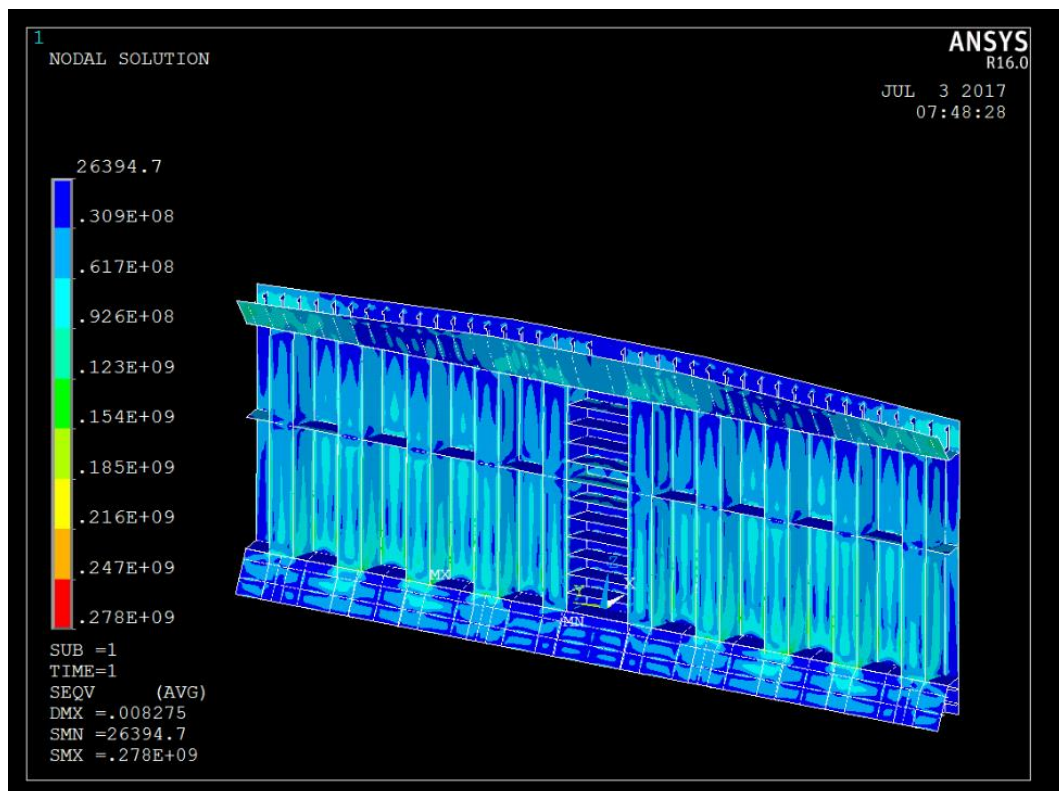
## BAB IV PEMBAHASAN

### IV.1. Hasil Simulasi Model 1

Model 1 merupakan variasi pertama untuk ketinggian *lower stool*, yaitu 1280 mm. Berdasarkan variasi yang telah ditentukan pada Sub-Bab III.3, Model 1 dibagi menjadi 3 model berdasarkan variasi ketebalan diafragma. Setelah proses konvergensi selesai dilakukan, kemudian model dengan variasi ketebalan diafragma disimulasi untuk menganalisis pengaruh perubahan ketebalan diafragma yang dipasang pada sekat bergelombang.

#### IV.1.1. Model 1A

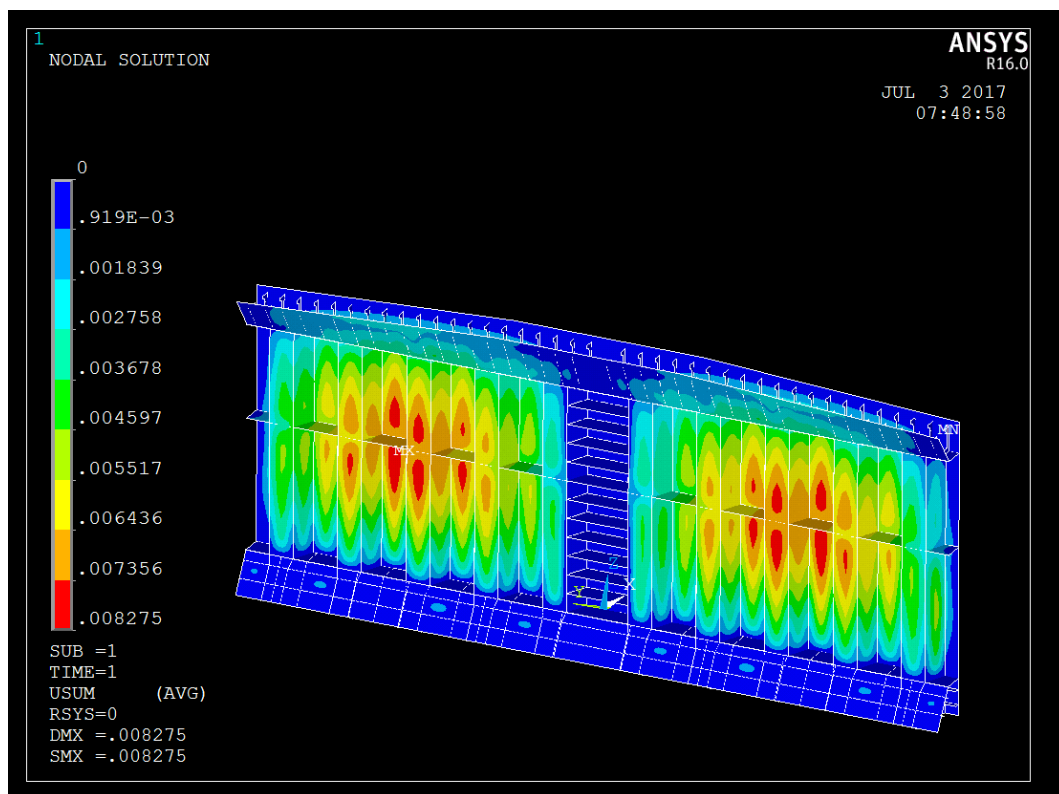
Model 1A merupakan model sekat bergelombang dengan tinggi *lower stool* sebesar 1280 mm dengan ketebalan diafragma 14 mm. Dari simulasi model ini diperoleh nilai tegangan konstruksi yang ditunjukkan pada Gambar IV.1, dan nilai deformasi konstruksi sekat yang ditunjukkan pada Gambar IV.2.



Gambar IV.1 Tegangan Konstruksi Pada Model 1A

Berdasarkan Sub-Bab II.10 dijelaskan bahwa untuk mengetahui nilai tegangan yang diperbolehkan pada model struktur, digunakan tegangan von mises. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.1 adalah tegangan yang terjadi pada Model 1A menggunakan interpretasi tegangan von mises. Didapatkan nilai tegangan maksimum sebesar  $278 \times 10^9$  Pa atau 278 MPa. Nilai tegangan maksimum dialami model terjadi pada bagian sambungan antara pelat atas *lower stool* dengan ujung bawah pelat sekat bergelombang. Bagian yang mengalami tegangan maksimum termasuk dalam kriteria *fine mesh zone*.

Nilai deformasi maksimum pada Model 1A seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.2, yaitu sebesar 0.008275 m atau 8.275 mm. Nilai deformasi diambil berdasarkan hasil jumlah dari deformasi yang terjadi pada tiga arah sumbu, yaitu deformasi pada arah sumbu-X, deformasi pada arah sumbu-Y, dan deformasi pada arah sumbu-Z. Deformasi maksimum terjadi pada bagian sambungan antara pelat sekat bergelombang dengan diafragma sekat.

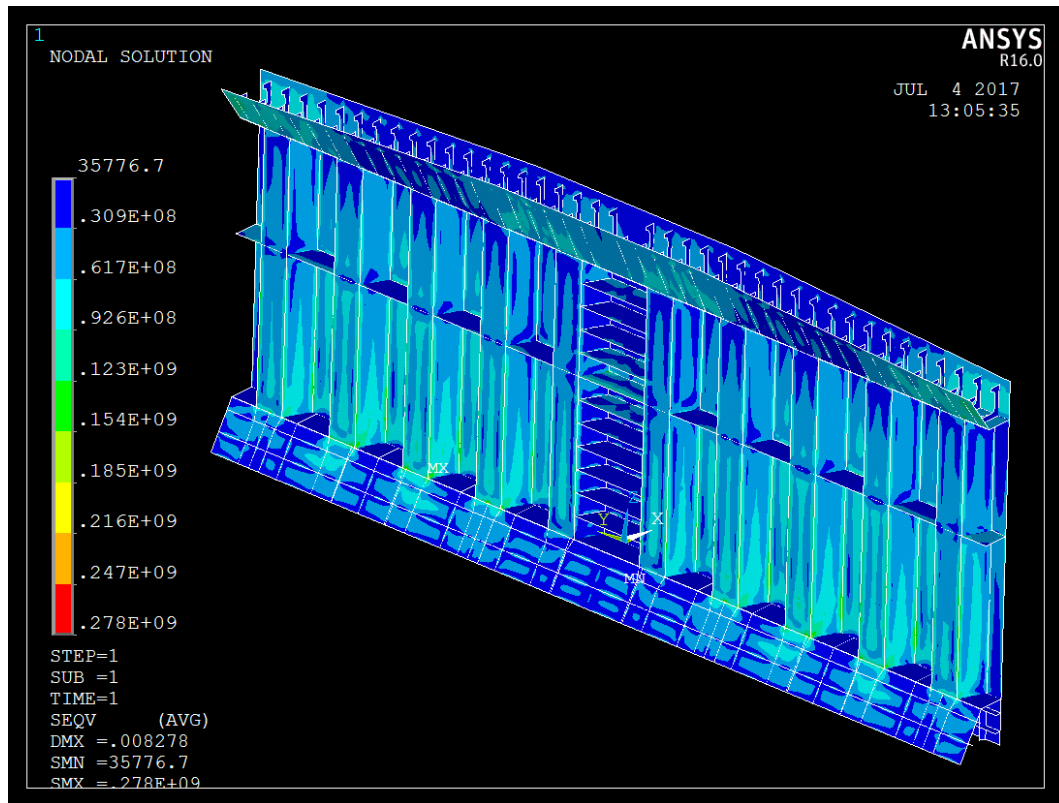


Gambar IV.2 Deformasi Pada Model 1A

#### IV.1.2. Model 1B

Model 1B merupakan model sekat bergelombang dengan tinggi lower stool sebesar 1280 mm dengan ketebalan diafragma 13 mm. Dari simulasi model ini diperoleh nilai

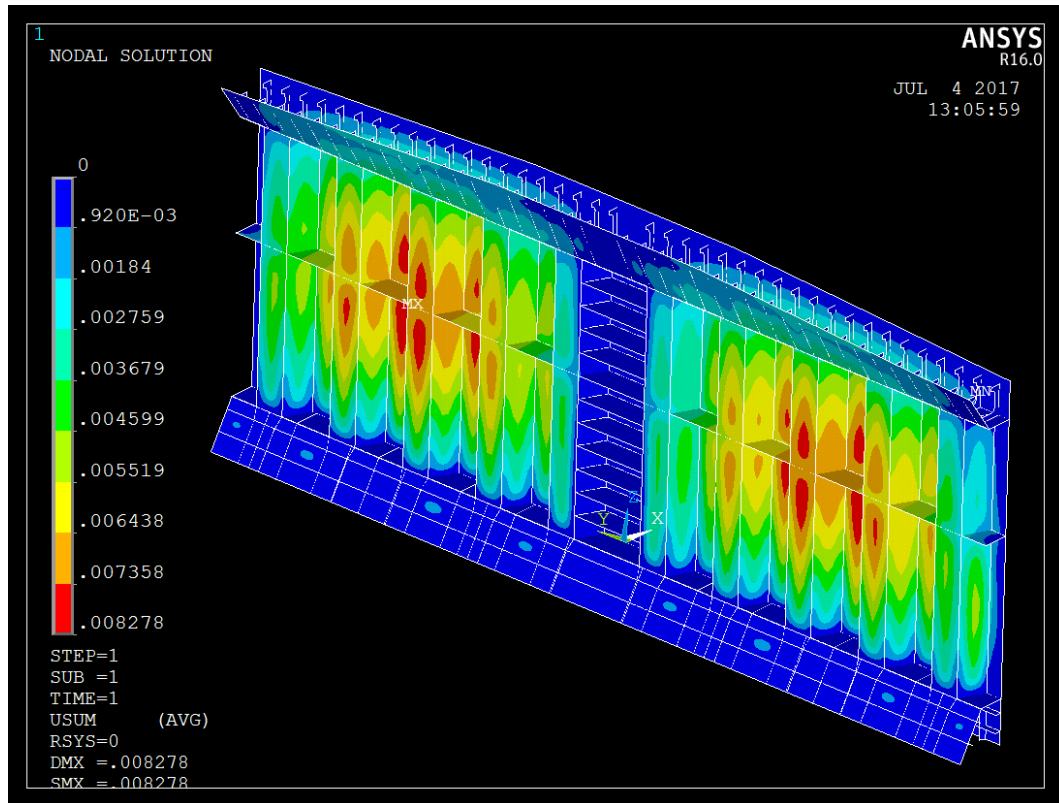
tegangan dan deformasi konstruksi seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.3 dan Gambar IV.4.



Gambar IV.3 Tegangan Konstruksi Pada Model 1B

Berdasarkan Sub-Bab II.10 dijelaskan bahwa untuk mengetahui nilai tegangan yang diperbolehkan pada model struktur, digunakan tegangan von mises. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.9 adalah tegangan yang terjadi pada Model 1A menggunakan interpretasi tegangan von mises. Didapatkan nilai tegangan maksimum sebesar  $278 \times 10^9$  Pa atau 278 MPa. Nilai tegangan maksimum dialami model terjadi pada bagian sambungan antara pelat atas *lower stool* dengan ujung bawah pelat sekat bergelombang. Bagian yang mengalami tegangan maksimum termasuk dalam kriteria *fine mesh zone*.

Nilai deformasi maksimum pada Model 1B seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.4, yaitu sebesar 0.008278 m atau 8.278 mm. Nilai deformasi diambil berdasarkan hasil jumlah dari deformasi yang terjadi pada tiga arah sumbu, yaitu deformasi pada arah sumbu-X, deformasi pada arah sumbu-Y, dan deformasi pada arah sumbu-Z. Deformasi maksimum terjadi pada bagian sambungan antara pelat sekat bergelombang dengan diafragma sekat.



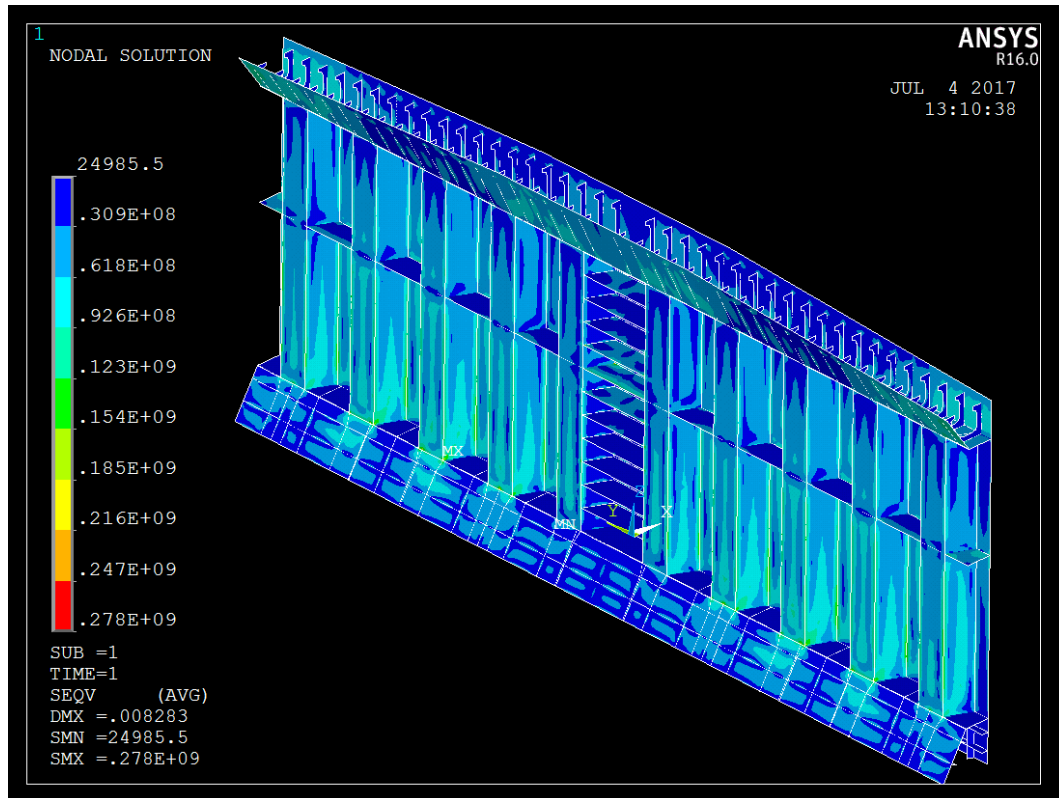
Gambar IV.4 Deformasi Pada Model 1B

#### IV.1.3. Model 1C

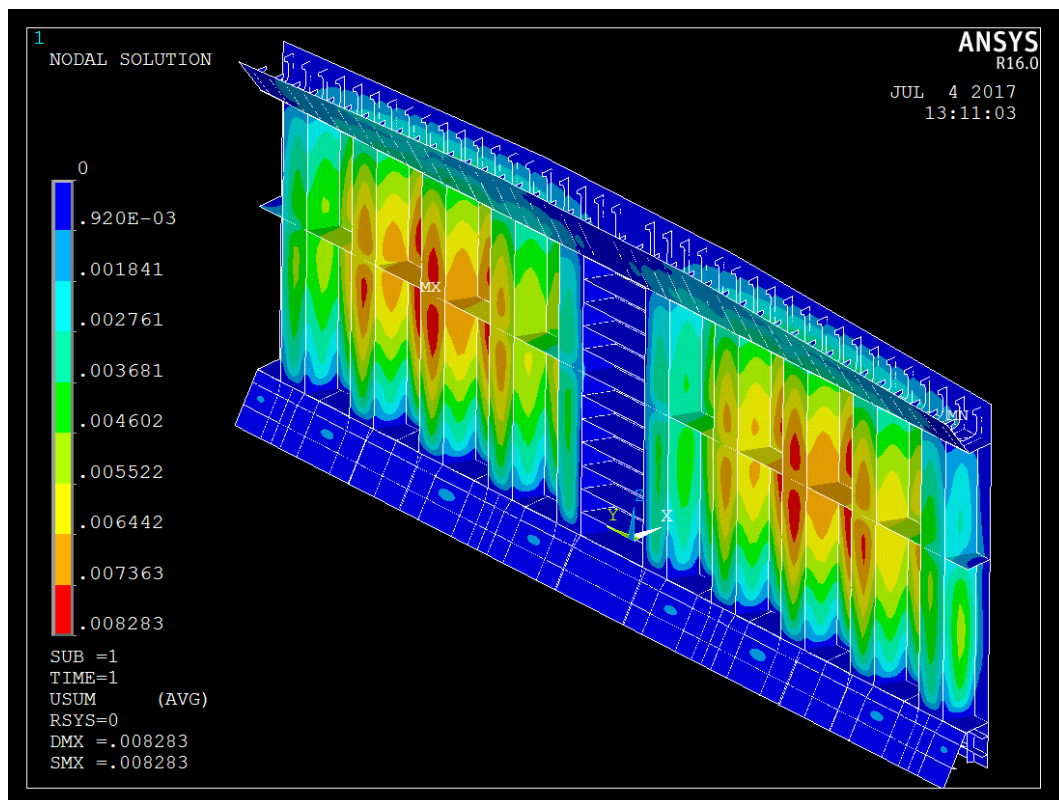
Model 1C merupakan model sekat bergelombang dengan tinggi *lower stool* sebesar 1280 mm dengan ketebalan diafragma 11 mm. Dari simulasi model ini diperoleh nilai tegangan dan deformasi konstruksi.

Berdasarkan Sub-Bab II.10 dijelaskan bahwa untuk mengetahui nilai tegangan yang diperbolehkan pada model struktur, digunakan tegangan von mises. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.5 adalah tegangan yang terjadi pada Model 1C menggunakan interpretasi tegangan von mises. Didapatkan nilai tegangan maksimum sebesar  $278 \times 10^9$  Pa atau 278 MPa. Nilai tegangan maksimum dialami model terjadi pada bagian sambungan antara pelat atas *lower stool* dengan ujung bawah pelat sekat bergelombang. Bagian yang mengalami tegangan maksimum termasuk dalam kriteria *fine mesh zone*.





Gambar IV.5 Tegangan Konstruksi Pada Model 1C



Gambar IV.6 Deformasi Pada Model 1C

Nilai deformasi maksimum pada Model 1C ditunjukkan pada Gambar IV.6, yaitu sebesar 0.008283 m atau 8.283 mm. Nilai deformasi diambil berdasarkan hasil jumlah dari deformasi yang terjadi pada tiga arah sumbu, yaitu deformasi pada arah sumbu-X, deformasi pada arah sumbu-Y, dan deformasi pada arah sumbu-Z. Deformasi maksimum terjadi pada bagian sambungan antara pelat sekat bergelombang dengan diafragma sekat.

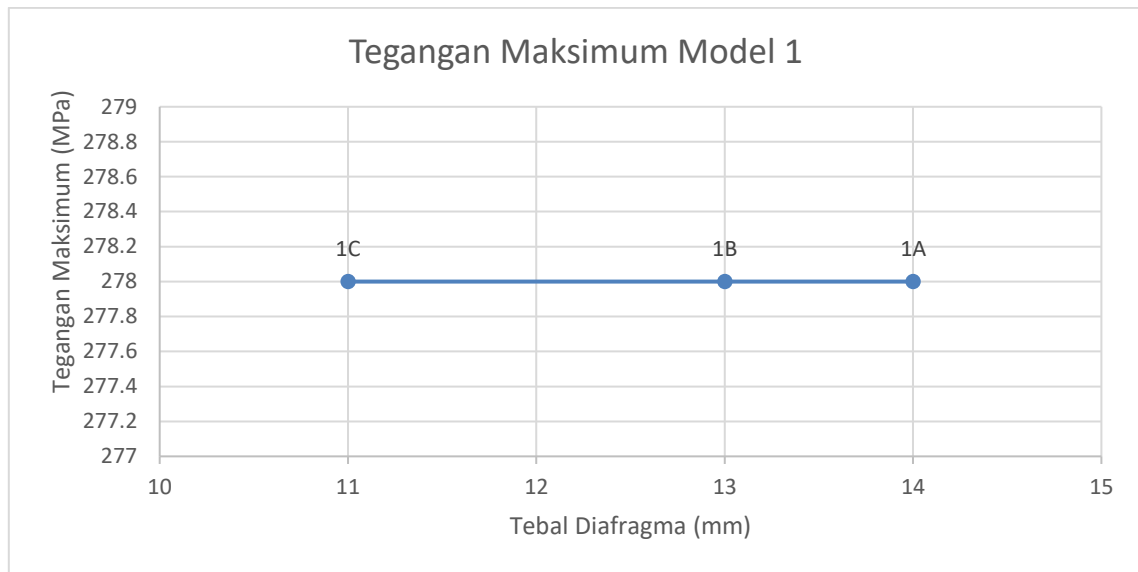
#### IV.1.4. Perbandingan Hasil Simulasi Pada Variasi Tebal Diafragma Sekat Model 1

Dari hasil simulasi diperoleh nilai tegangan dan deformasi untuk setiap model dengan variasi tebal diafragma sekat pada Model 1. Hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel IV.1.

Tabel IV.1 Hasil Simulasi Model 1

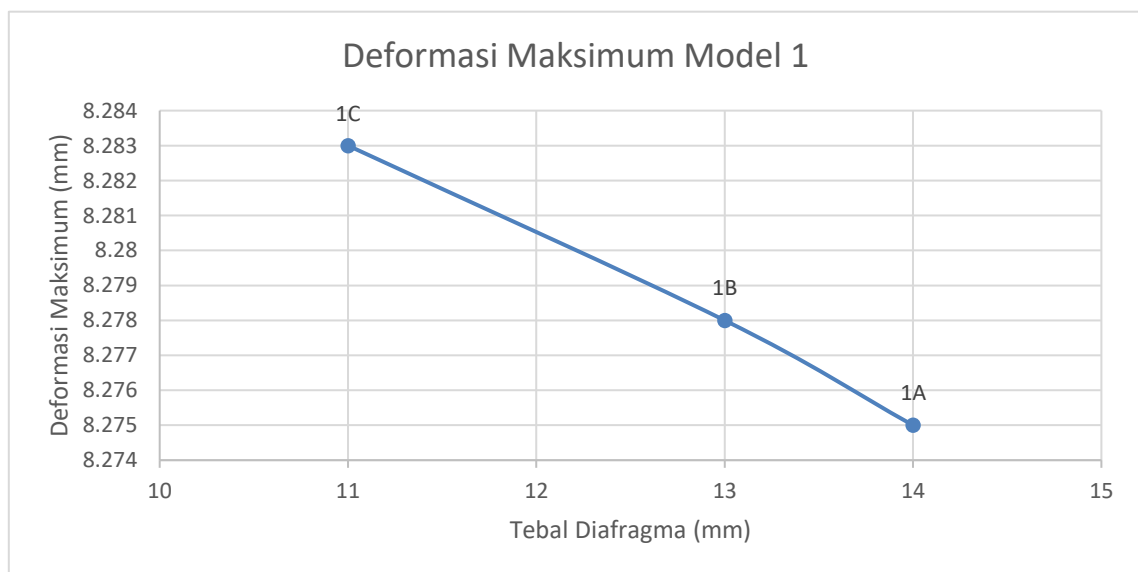
Model	Tinggi Stool (mm)	Tebal Diafragma (mm)	Tegangan Maksimum (MPa)	Deformasi Maksimum (mm)
1A	1280	14	278	8.275
1B		13	278	8.278
1C		11	278	8.283

Tabel IV.1 menunjukkan nilai tegangan maksimum dan deformasi maksimum untuk setiap variasi tebal diafragma sekat pada Model 1 dengan tinggi *lower stool* 1280 mm. Nilai tegangan maksimum yang terjadi untuk setiap variasi tebal diafragma sekat tidak mengalami perubahan, dengan nilai 278 MPa. Pengaruh perubahan tebal diafragma terhadap tegangan maksimum yang terjadi pada model ditunjukkan pada Gambar IV.7. Untuk nilai deformasi maksimum terbesar terjadi pada tebal diafragma 11 mm, dengan nilai 8.283 mm, dan nilai terkecil pada tebal diafragma 14 mm, dengan nilai 8.275 mm. Pengaruh perubahan tebal diafragma terhadap deformasi maksimum yang dialami model ditunjukkan pada Gambar IV.8.



Gambar IV.7 Grafik Tegangan Maksimum Pada Variasi Model 1

Gambar IV.7 menunjukkan pengaruh perubahan tebal diafragma terhadap tegangan maksimum yang terjadi pada Model 1. Pada ketebalan diafragma terkecil 11 mm, terjadi tegangan maksimum sebesar 278 MPa. Kemudian dengan penambahan ketebalan menjadi 13 mm, nilai tegangan maksimum tidak berubah yaitu sebesar 278 MPa. Kemudian tebal diafragma terus bertambah menjadi 14 mm, dan nilai tegangan maksimum tidak berubah yaitu 278 MPa. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pengurangan ketebalan diafragma sekat mencapai 20% dari data kapal sesungguhnya tidak mempengaruhi nilai tegangan maksimum yang terjadi pada Model 1 dengan tinggi *lower stool* 1280 mm.



Gambar IV.8 Grafik Deformasi Maksimum Pada Variasi Model 1

Gambar IV.8 menunjukkan pengaruh perubahan tebal diafragma pada nilai deformasi maksimum yang terjadi pada Model 1. Nilai deformasi maksimum terbesar terjadi pada tebal diafragma terkecil yaitu 11 mm. Dengan penambahan tebal diafragma sebesar 2 mm, menjadi 13 mm, nilai deformasi maksimum yang terjadi semakin berkurang. Nilai deformasi tersebut terus berkurang seiring dengan penambahan tebal diafragma sekat menjadi 14 mm, sehingga nilai deformasi maksimum terendah terjadi pada tebal diafragma 14 mm. Dapat dikatakan bahwa penambahan tebal diafragma sekat berpengaruh pada turunnya nilai deformasi maksimum yang terjadi pada Model 1.

## **IV.2. Hasil Simulasi Model 2**

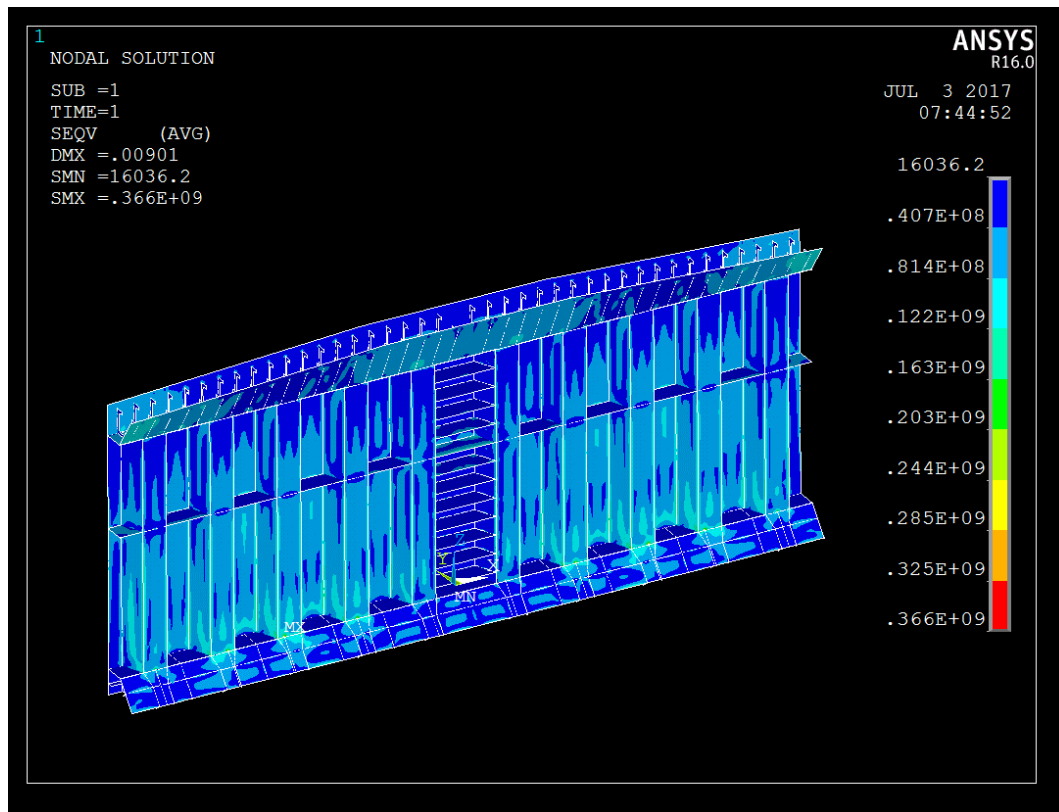
Model 2 merupakan variasi pertama untuk ketinggian *lower stool*, yaitu 895 mm. Berdasarkan variasi yang telah ditentukan pada Sub-Bab III.3, Model 2 dibagi menjadi 3 model berdasarkan variasi ketebalan diafragma. Setelah proses konvergensi selesai dilakukan, kemudian model dengan variasi ketebalan diafragma disimulasi untuk menganalisis pengaruh perubahan ketebalan diafragma yang dipasang pada sekat bergelombang.

### **IV.2.1. Model 2A**

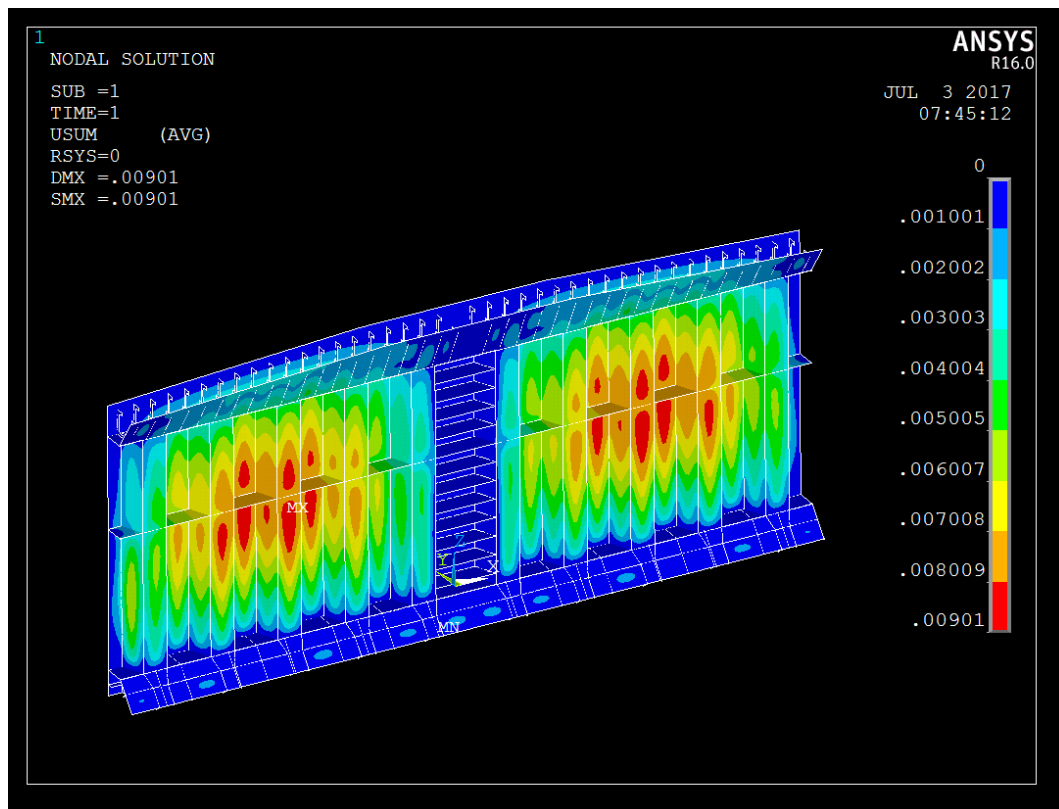
Model 2A merupakan model sekat bergelombang dengan tinggi *lower stool* sebesar 895 mm dengan ketebalan diafragma 14 mm. Dari simulasi model ini diperoleh nilai tegangan konstruksi yang ditunjukkan pada Gambar IV.9, dan nilai deformasi konstruksi sekat yang ditunjukkan pada Gambar IV.10.

Berdasarkan Sub-Bab II.10 dijelaskan bahwa untuk mengetahui nilai tegangan yang diperbolehkan pada model struktur, digunakan tegangan von mises. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.9 adalah tegangan yang terjadi pada Model 2A menggunakan interpretasi tegangan von mises. Didapatkan nilai tegangan maksimum sebesar  $366 \times 10^9$  Pa atau 366 MPa. Nilai tegangan maksimum dialami model terjadi pada bagian sambungan antara pelat atas *lower stool* dengan ujung bawah pelat sekat bergelombang. Bagian yang mengalami tegangan maksimum termasuk dalam kriteria *fine mesh zone*.

Nilai deformasi maksimum pada Model 2A seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.10, yaitu sebesar 0.00901 m atau 9.010 mm. Nilai deformasi diambil berdasarkan hasil jumlah dari deformasi yang terjadi pada tiga arah sumbu, yaitu deformasi pada arah sumbu-X, deformasi pada arah sumbu-Y, dan deformasi pada arah sumbu-Z. Deformasi maksimum terjadi pada bagian sambungan antara pelat sekat bergelombang dengan diafragma sekat.



Gambar IV.9 Tegangan Konstruksi Pada Model 2A

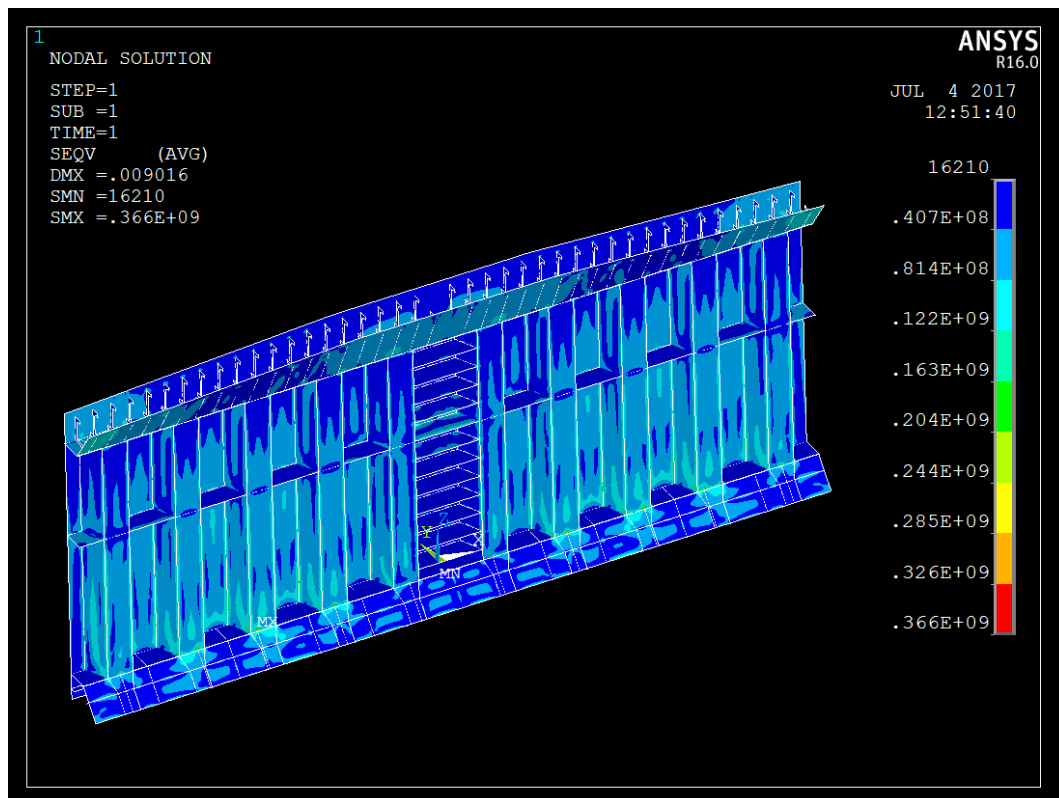


Gambar IV.10 Deformasi Pada Model 2A

#### IV.2.2. Model 2B

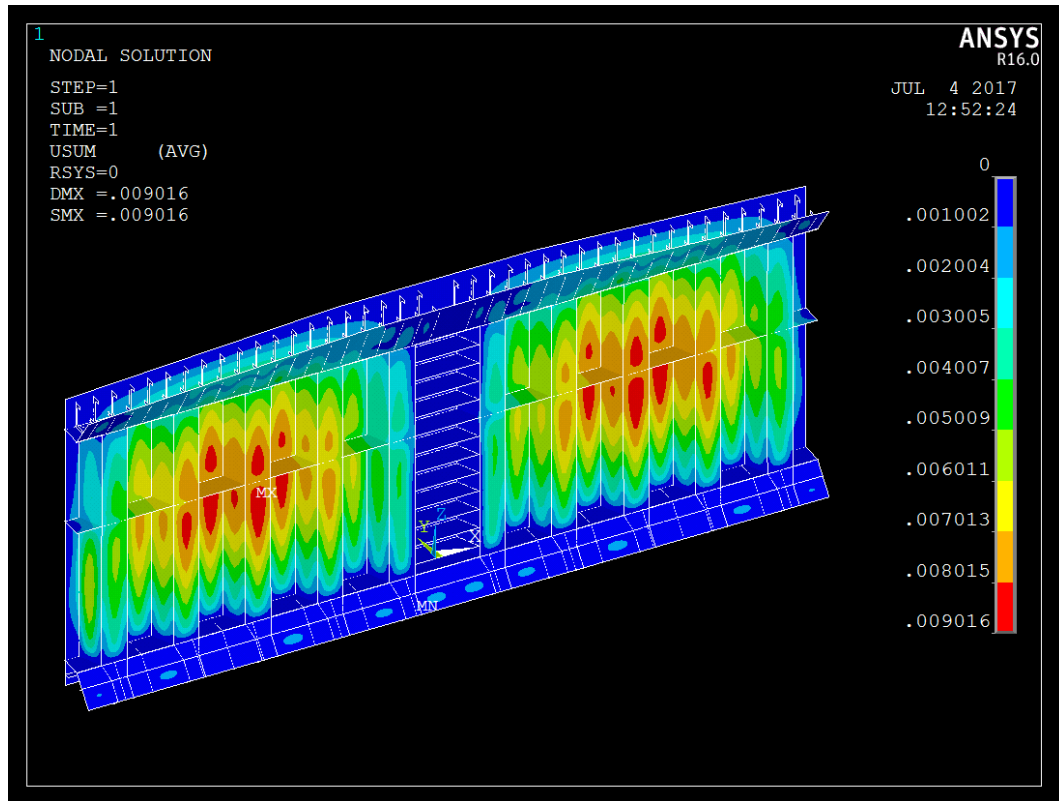
Model 2B merupakan model sekat bergelombang dengan tinggi *lower stool* sebesar 895 mm dengan ketebalan diafragma 13 mm. Dari simulasi model ini diperoleh nilai tegangan dan deformasi konstruksi.

Berdasarkan Sub-Bab II.10 dijelaskan bahwa untuk mengetahui nilai tegangan yang diperbolehkan pada model struktur, digunakan tegangan von mises. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.11 adalah tegangan yang terjadi pada Model 2B menggunakan interpretasi tegangan von mises. Didapatkan nilai tegangan maksimum sebesar  $366 \times 10^9$  Pa atau 366 MPa. Nilai tegangan maksimum dialami model terjadi pada bagian sambungan antara pelat atas *lower stool* dengan ujung bawah pelat sekat bergelombang. Bagian yang mengalami tegangan maksimum termasuk dalam kriteria *fine mesh zone*.



Gambar IV.11 Tegangan Konstruksi Pada Model 2B

Nilai deformasi maksimum pada Model 2B seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.12, yaitu sebesar 0.009016 m atau 9.016 mm. Nilai deformasi diambil berdasarkan hasil jumlah dari deformasi yang terjadi pada tiga arah sumbu, yaitu deformasi pada arah sumbu-X, deformasi pada arah sumbu-Y, dan deformasi pada arah sumbu-Z. Deformasi maksimum terjadi pada bagian sambungan antara pelat sekat bergelombang dengan diafragma sekat.

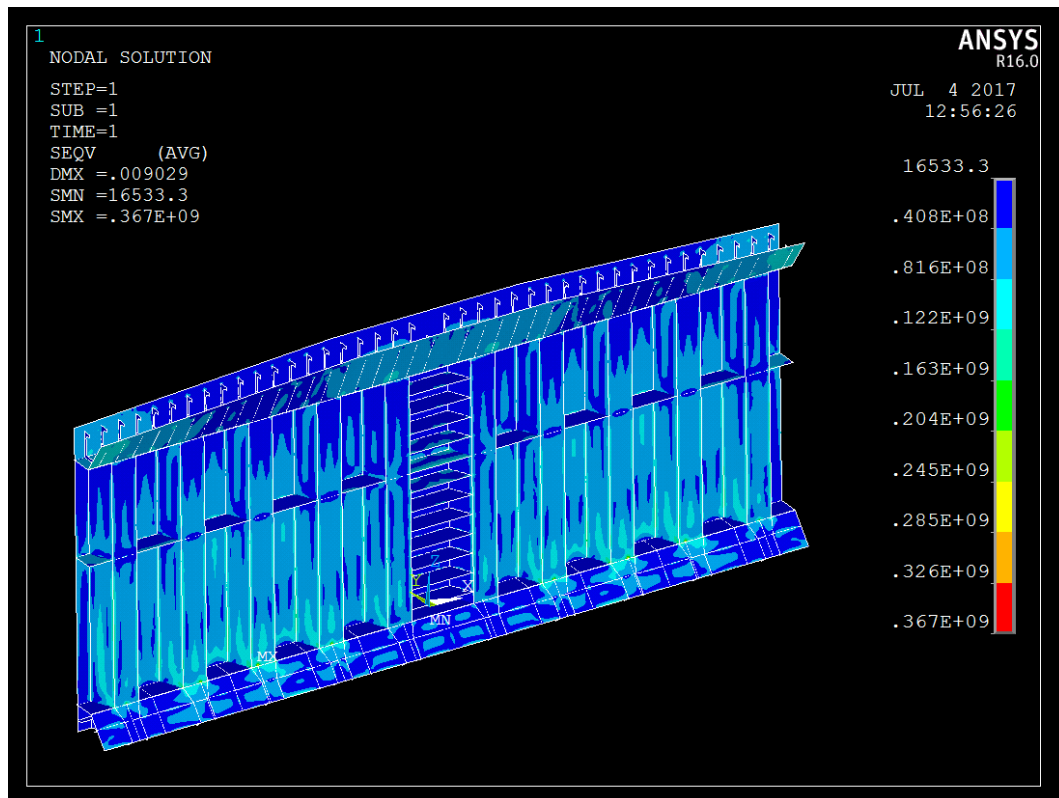


Gambar IV.12 Deformasi Pada Model 2B

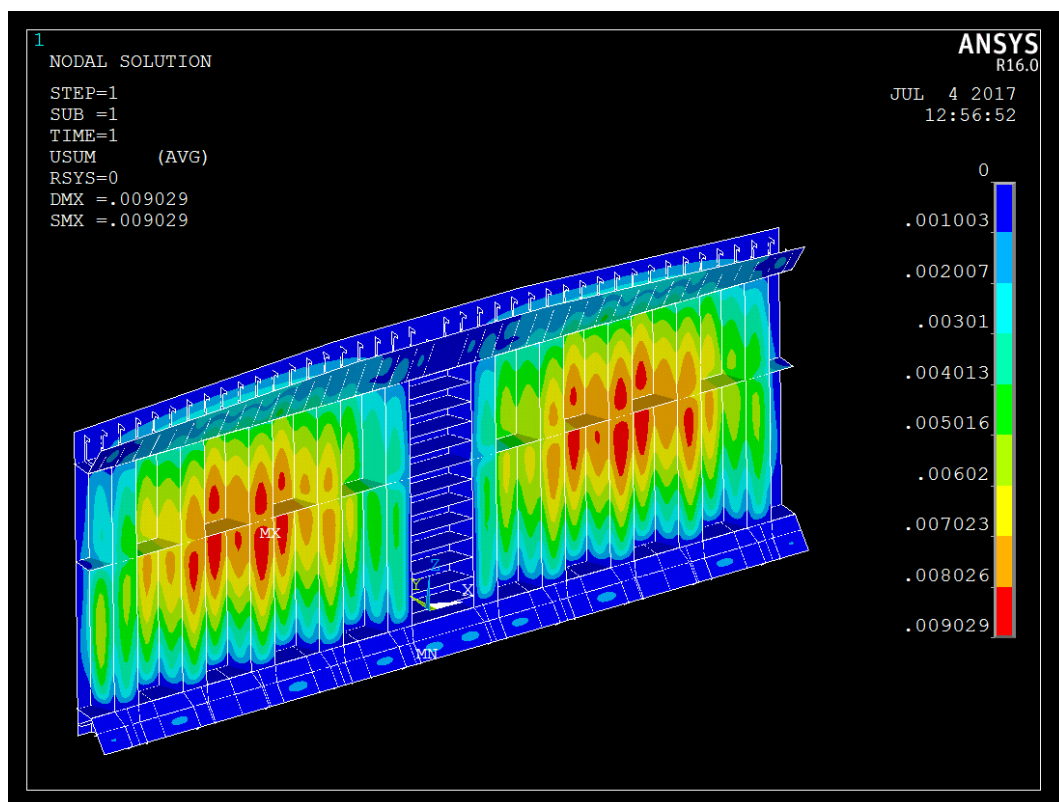
#### IV.2.3. Model 2C

Model 2C merupakan model sekat bergelombang dengan tinggi *lower stool* sebesar 895 mm dengan ketebalan diafragma 11 mm. Dari simulasi model ini diperoleh nilai tegangan dan deformasi konstruksi.

Berdasarkan Sub-Bab II.10 dijelaskan bahwa untuk mengetahui nilai tegangan yang diperbolehkan pada model struktur, digunakan tegangan von mises. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.13 adalah tegangan yang terjadi pada Model 2C menggunakan interpretasi tegangan von mises. Didapatkan nilai tegangan maksimum sebesar  $367 \times 10^9$  Pa atau 367 MPa. Nilai tegangan maksimum dialami model terjadi pada bagian sambungan antara pelat atas *lower stool* dengan ujung bawah pelat sekat bergelombang. Bagian yang mengalami tegangan maksimum termasuk dalam kriteria *fine mesh zone*.



Gambar IV.13 Tegangan Konstruksi Pada Model 2C



Gambar IV.14 Deformasi Pada Model 2C



Nilai deformasi maksimum pada Model 2C seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.14, yaitu sebesar 0.009029 m atau 9.029 mm. Nilai deformasi diambil berdasarkan hasil jumlah dari deformasi yang terjadi pada tiga arah sumbu, yaitu deformasi pada arah sumbu-X, deformasi pada arah sumbu-Y, dan deformasi pada arah sumbu-Z. Deformasi maksimum terjadi pada bagian sambungan antara pelat sekat bergelombang dengan diafragma sekat.

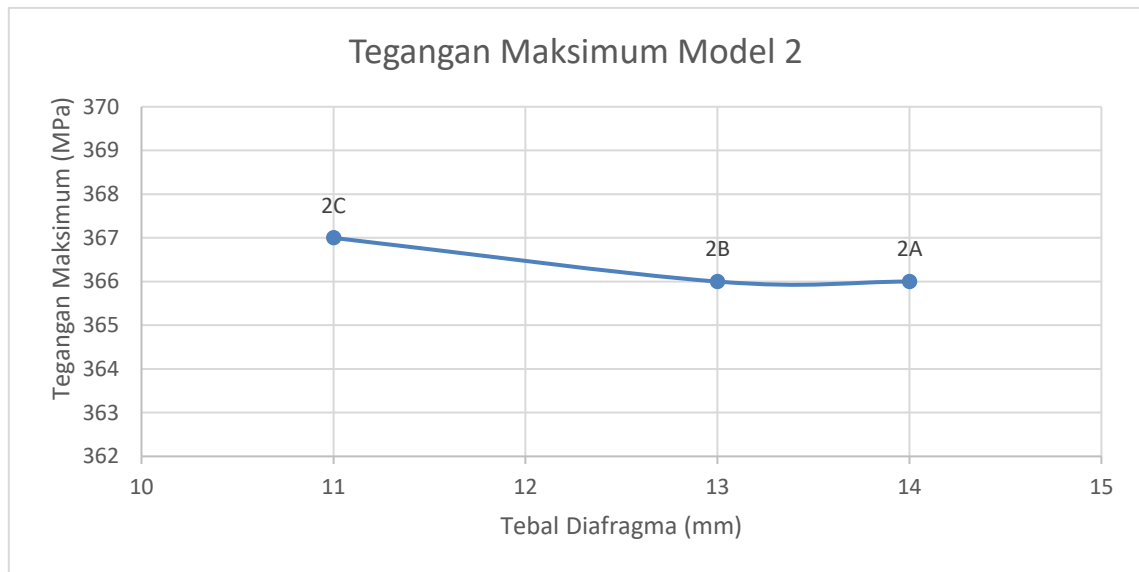
#### IV.2.4. Perbandingan Hasil Simulasi Pada Variasi Tebal Diafragma Sekat Model 2

Dari hasil simulasi diperoleh nilai tegangan dan deformasi untuk setiap model dengan variasi tebal diafragma sekat pada Model 2. Hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel IV.2.

Tabel IV.2 Hasil Simulasi Model 2

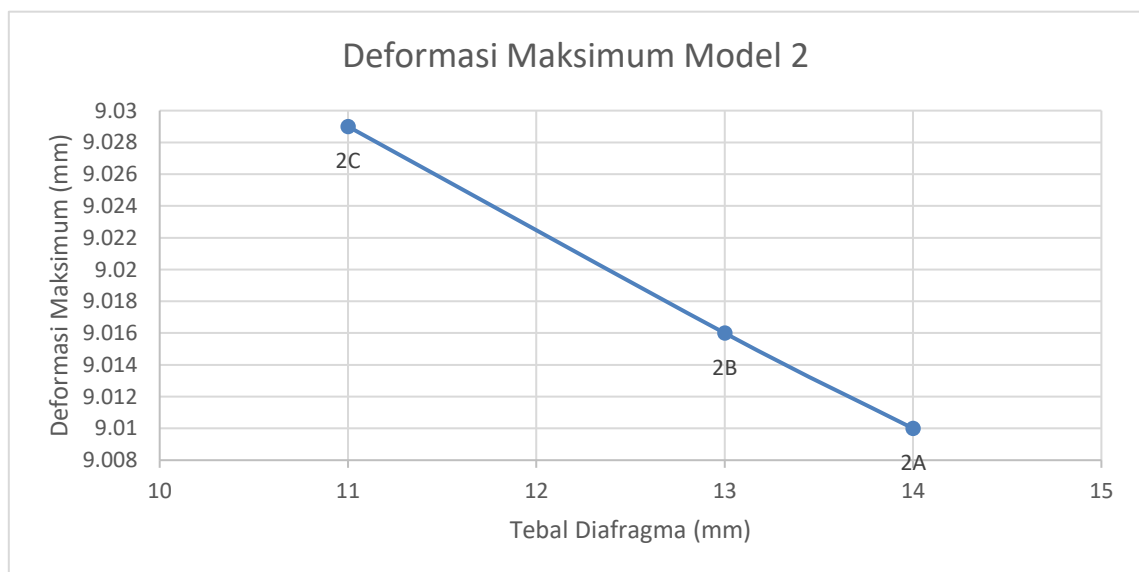
Model	Tinggi Stool (mm)	Tebal Diafragma (mm)	Tegangan Maksimum (MPa)	Deformasi Maksimum (mm)
2A	895	14	366	9.010
2B		13	366	9.016
2C		11	367	9.029

Tabel IV.2 menunjukkan nilai tegangan maksimum dan deformasi maksimum untuk setiap variasi tebal diafragma sekat pada Model 2 dengan tinggi *lower stool* 895 mm. Nilai tegangan maksimum terbesar untuk setiap variasi tebal diafragma sekat terjadi pada tebal diafragma 11 mm, yaitu sebesar 367 MPa, sedangkan nilai terendah terjadi pada tebal diafragma 13 mm dan 14 mm, dengan nilai 366 MPa. Pengaruh perubahan tebal diafragma terhadap tegangan maksimum yang terjadi pada model ditunjukkan pada Gambar IV.15. Untuk nilai deformasi maksimum terbesar terjadi pada tebal diafragma 11 mm, dengan nilai 9.029 mm, dan nilai terkecil pada tebal diafragma 14 mm, dengan nilai 9.010 mm. pengaruh perubahan tebal diafragma terhadap deformasi maksimum yang dialami model ditunjukkan pada Gambar IV.16.



Gambar IV.15 Grafik Tegangan Maksimum Pada Variasi Model 2

Gambar IV.7 menunjukkan pengaruh perubahan tebal diafragma terhadap tegangan maksimum yang terjadi pada Model 2. Pada ketebalan diafragma terkecil 11 mm, terjadi tegangan maksimum sebesar 367 MPa. Kemudian dengan penambahan ketebalan menjadi 13 mm, nilai tegangan maksimum berkurang menjadi sebesar 366 MPa. Kemudian tebal diafragma terus bertambah menjadi 14 mm, dan nilai tegangan maksimum tidak berubah yaitu 366 MPa. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pada Model 2 dengan tinggi *lower stool* 895 mm, pengurangan ketebalan diafragma sekat mulai mempengaruhi nilai tegangan maksimum pada pengurangan ketebalan sebesar 20% dari data kapal sesungguhnya.



Gambar IV.16 Grafik Deformasi Maksimum Pada Variasi Model 2

Gambar IV.16 menunjukkan pengaruh perubahan tebal diafragma pada nilai deformasi maksimum yang terjadi pada Model 2. Nilai deformasi maksimum terbesar terjadi pada tebal diafragma terkecil yaitu 11 mm. Dengan penambahan tebal diafragma sebesar 2 mm, menjadi 13 mm, nilai deformasi maksimum yang terjadi semakin berkurang. Nilai deformasi tersebut terus berkurang seiring dengan penambahan tebal diafragma sekat menjadi 14 mm, sehingga nilai deformasi maksimum terendah terjadi pada tebal diafragma 14 mm. Dapat dikatakan bahwa penambahan tebal diafragma sekat berpengaruh pada turunnya nilai deformasi maksimum yang terjadi pada Model 2.

### **IV.3. Hasil Simulasi Model 3**

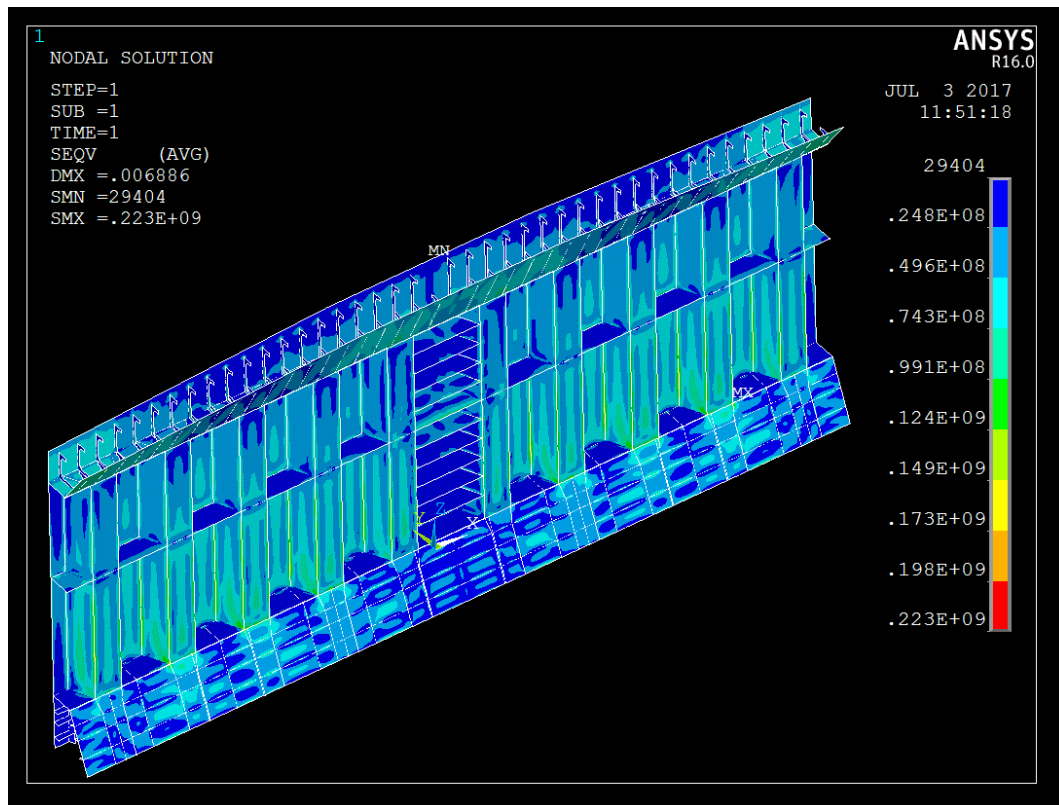
Model 3 merupakan variasi pertama untuk ketinggian *lower stool*, yaitu 1790 mm. Berdasarkan variasi yang telah ditentukan pada Sub-Bab III.3, Model 3 dibagi menjadi 3 model berdasarkan variasi ketebalan diafragma. Setelah proses konvergensi selesai dilakukan, kemudian model dengan variasi ketebalan diafragma disimulasi untuk menganalisis pengaruh perubahan ketebalan diafragma yang dipasang pada sekat bergelombang.

#### **IV.3.1. Model 3A**

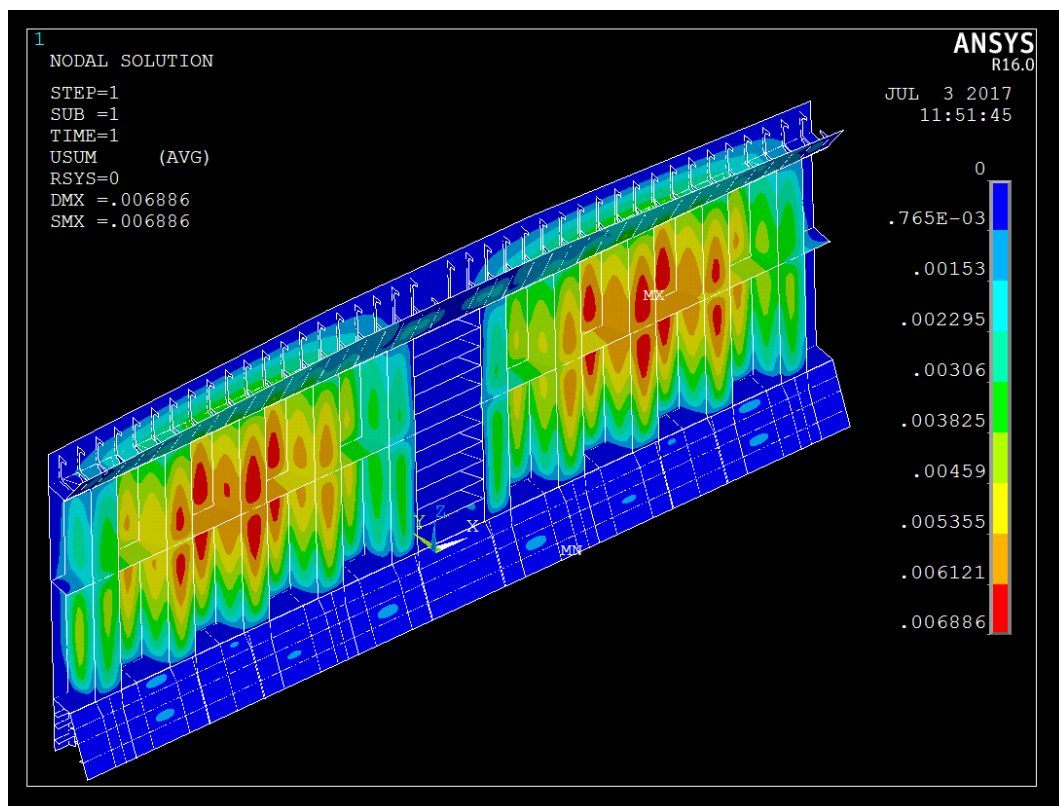
Model 3A merupakan model sekat bergelombang dengan tinggi *lower stool* sebesar 1790 mm dengan ketebalan diafragma 14 mm. Dari simulasi model ini diperoleh nilai tegangan konstruksi yang ditunjukkan pada Gambar IV.17, dan nilai deformasi konstruksi sekat yang ditunjukkan pada Gambar IV.18.

Berdasarkan Sub-Bab II.10 dijelaskan bahwa untuk mengetahui nilai tegangan yang diperbolehkan pada model struktur, digunakan tegangan von mises. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.17 adalah tegangan yang terjadi pada Model 3A menggunakan interpretasi tegangan von mises. Didapatkan nilai tegangan maksimum sebesar  $223 \times 10^9$  Pa atau 223 MPa. Nilai tegangan maksimum dialami model terjadi pada bagian sambungan antara pelat atas *lower stool* dengan ujung bawah pelat sekat bergelombang. Bagian yang mengalami tegangan maksimum termasuk dalam kriteria *fine mesh zone*.

Nilai deformasi maksimum pada Model 3A seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.18, yaitu sebesar 0.006886 m atau 6.886 mm. Nilai deformasi diambil berdasarkan hasil jumlah dari deformasi yang terjadi pada tiga arah sumbu, yaitu deformasi pada arah sumbu-X, deformasi pada arah sumbu-Y, dan deformasi pada arah sumbu-Z. Deformasi maksimum terjadi pada bagian sambungan antara pelat sekat bergelombang dengan diafragma sekat.



Gambar IV.17 Tegangan Konstruksi Pada Model 3A

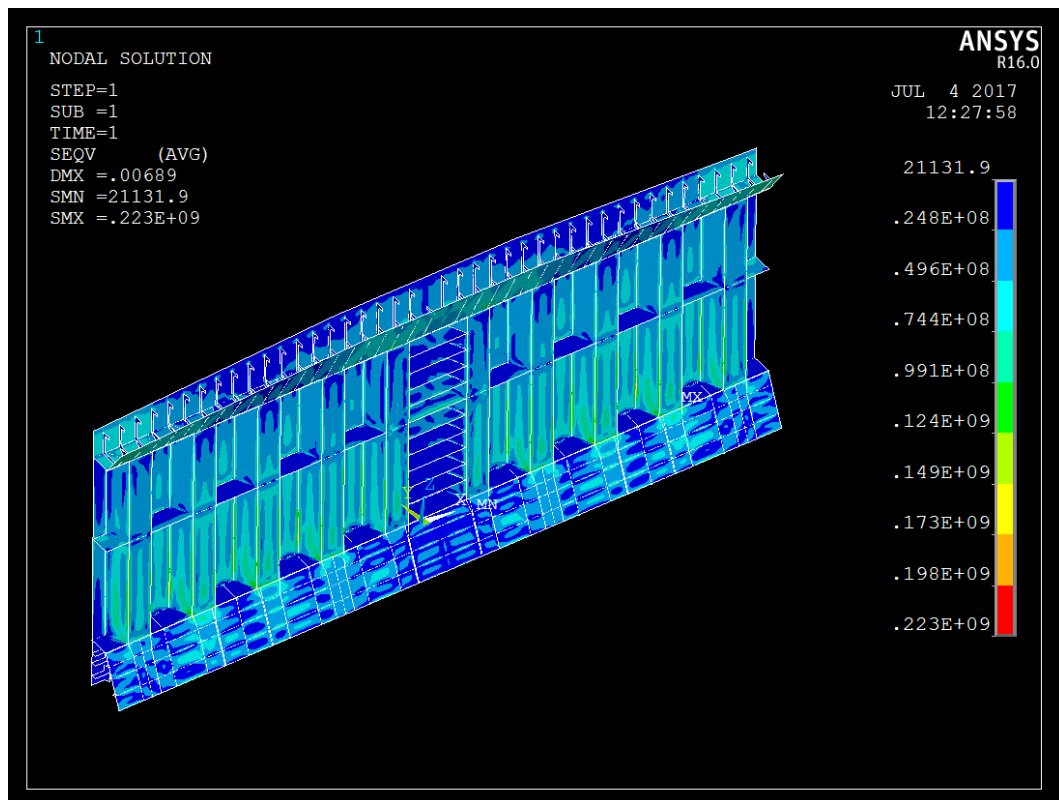


Gambar IV.18 Deformasi Pada Model 3A

#### IV.3.2. Model 3B

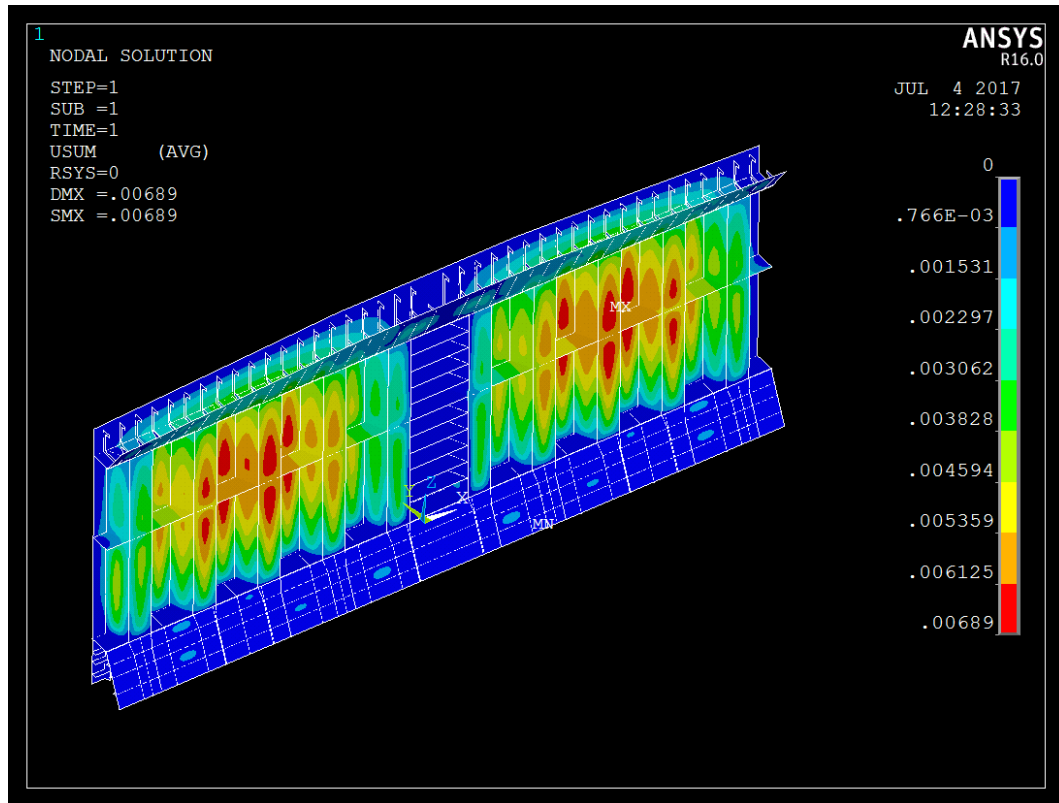
Model 3B merupakan model sekat bergelombang dengan tinggi *lower stool* sebesar 1790 mm dengan ketebalan diafragma 13 mm. Dari simulasi model ini diperoleh nilai tegangan dan deformasi konstruksi.

Berdasarkan Sub-Bab II.10 dijelaskan bahwa untuk mengetahui nilai tegangan yang diperbolehkan pada model struktur, digunakan tegangan von mises. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.19 adalah tegangan yang terjadi pada Model 3B menggunakan interpretasi tegangan von mises. Didapatkan nilai tegangan maksimum sebesar  $223 \times 10^9$  Pa atau 223 MPa. Nilai tegangan maksimum dialami model terjadi pada bagian sambungan antara pelat atas *lower stool* dengan ujung bawah pelat sekat bergelombang. Bagian yang mengalami tegangan maksimum termasuk dalam kriteria *fine mesh zone*.



Gambar IV.19 Tegangan Konstruksi Pada Model 3B

Nilai deformasi maksimum pada Model 3B seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.20, yaitu sebesar 0.006890 m atau 6.890 mm. Nilai deformasi diambil berdasarkan hasil jumlah dari deformasi yang terjadi pada tiga arah sumbu, yaitu deformasi pada arah sumbu-X, deformasi pada arah sumbu-Y, dan deformasi pada arah sumbu-Z. Deformasi maksimum terjadi pada bagian sambungan antara pelat sekat bergelombang dengan diafragma sekat.

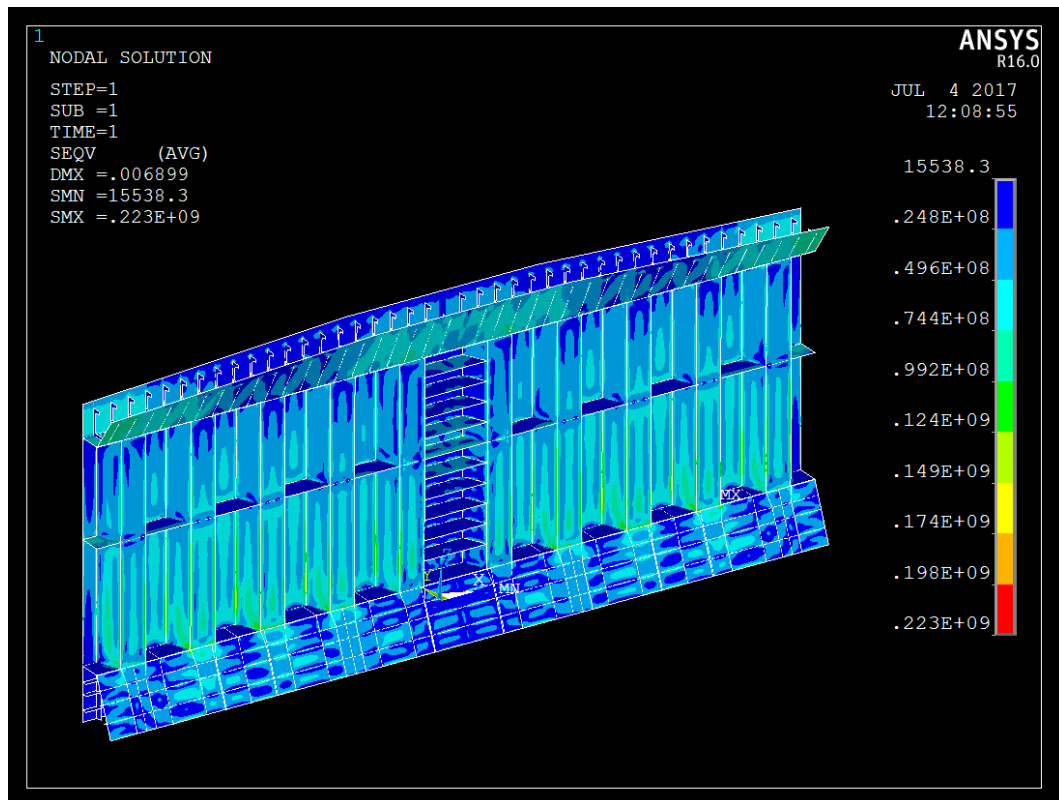


Gambar IV.20 Deformasi Pada Model 3B

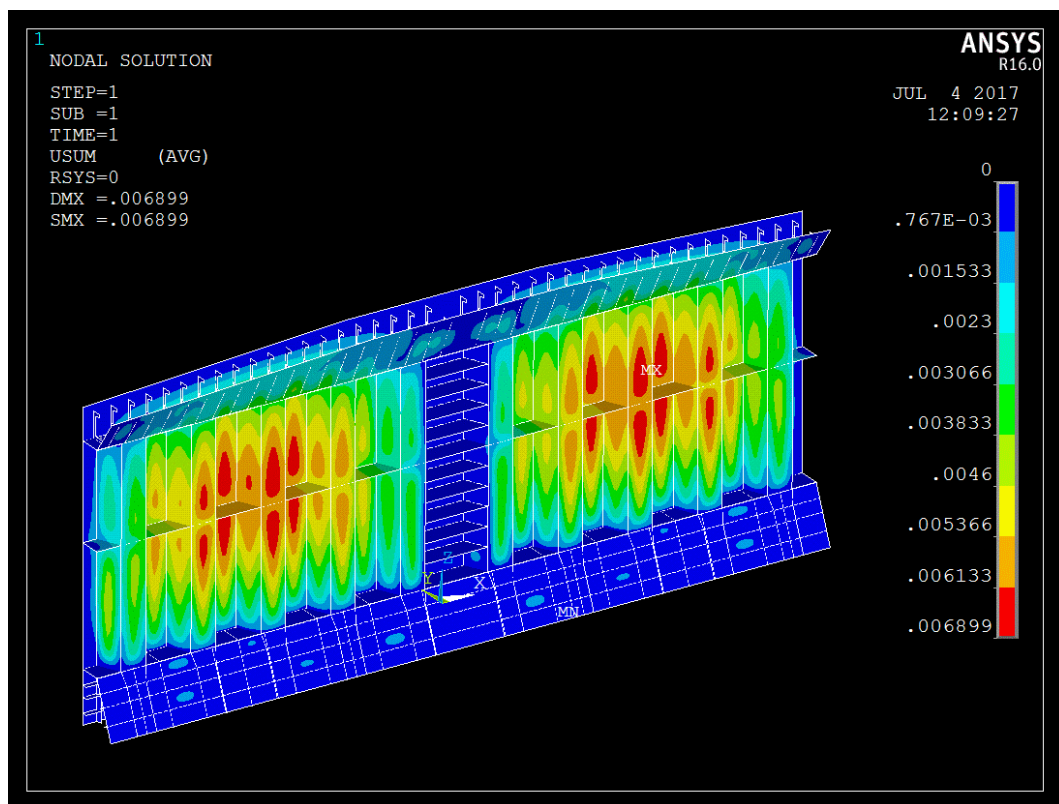
### IV.3.3. Model 3C

Model 3C merupakan model sekat bergelombang dengan tinggi *lower stool* sebesar 1790 mm dengan ketebalan diafragma 11 mm. Dari simulasi model ini diperoleh nilai tegangan dan deformasi konstruksi.

Berdasarkan Sub-Bab II.10 dijelaskan bahwa untuk mengetahui nilai tegangan yang diperbolehkan pada model struktur, digunakan tegangan von mises. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.21 adalah tegangan yang terjadi pada Model 3C menggunakan interpretasi tegangan von mises. Didapatkan nilai tegangan maksimum sebesar  $223 \times 10^9$  Pa atau 223 MPa. Nilai tegangan maksimum dialami model terjadi pada bagian sambungan antara pelat atas *lower stool* dengan ujung bawah pelat sekat bergelombang. Bagian yang mengalami tegangan maksimum termasuk dalam kriteria *fine mesh zone*.



Gambar IV.21 Tegangan Konstruksi Pada Model 3C



Gambar IV.22 Deformasi Pada Model 3C

Nilai deformasi maksimum pada Model 1A seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.22, yaitu sebesar 0.006899 m atau 6.899 mm. Nilai deformasi diambil berdasarkan hasil jumlah dari deformasi yang terjadi pada tiga arah sumbu, yaitu deformasi pada arah sumbu-X, deformasi pada arah sumbu-Y, dan deformasi pada arah sumbu-Z. Deformasi maksimum terjadi pada bagian sambungan antara pelat sekat bergelombang dengan diafragma sekat.

#### IV.3.4. Perbandingan Hasil Simulasi Pada Variasi Tebal Diafragma Sekat Model 3

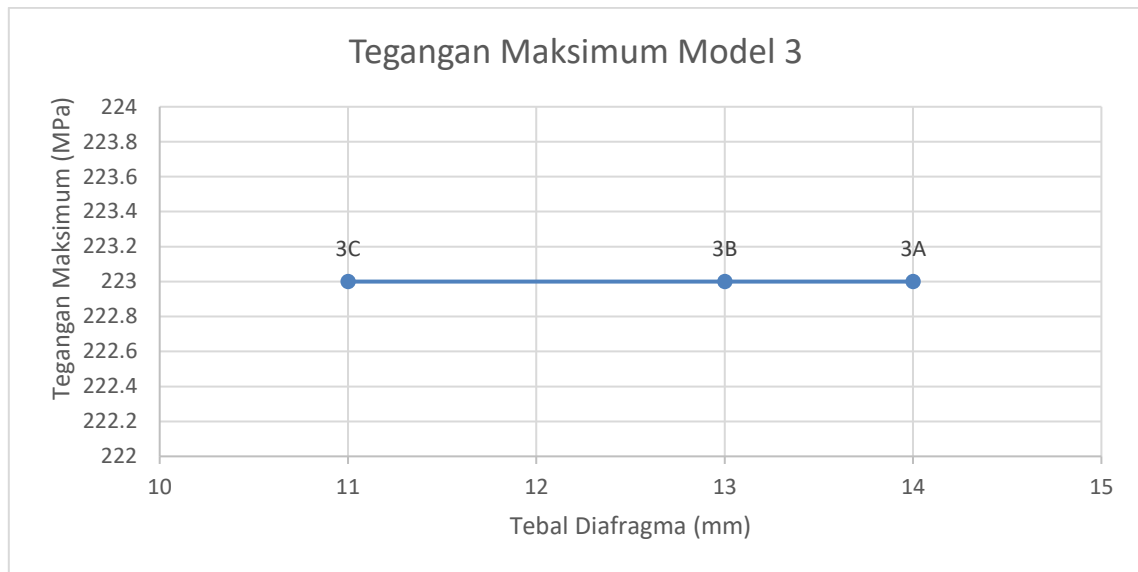
Dari hasil simulasi diperoleh nilai tegangan dan deformasi untuk setiap model dengan variasi tebal diafragma sekat pada Model 3. Hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel IV.3.

Tabel IV.3 Hasil Simulasi Model 3

Model	Tinggi Stool (mm)	Tebal Diafragma (mm)	Tegangan Maksimum (MPa)	Deformasi Maksimum (mm)
3A	1790	14	223	6.886
3B		13	223	6.890
3C		11	223	6.899

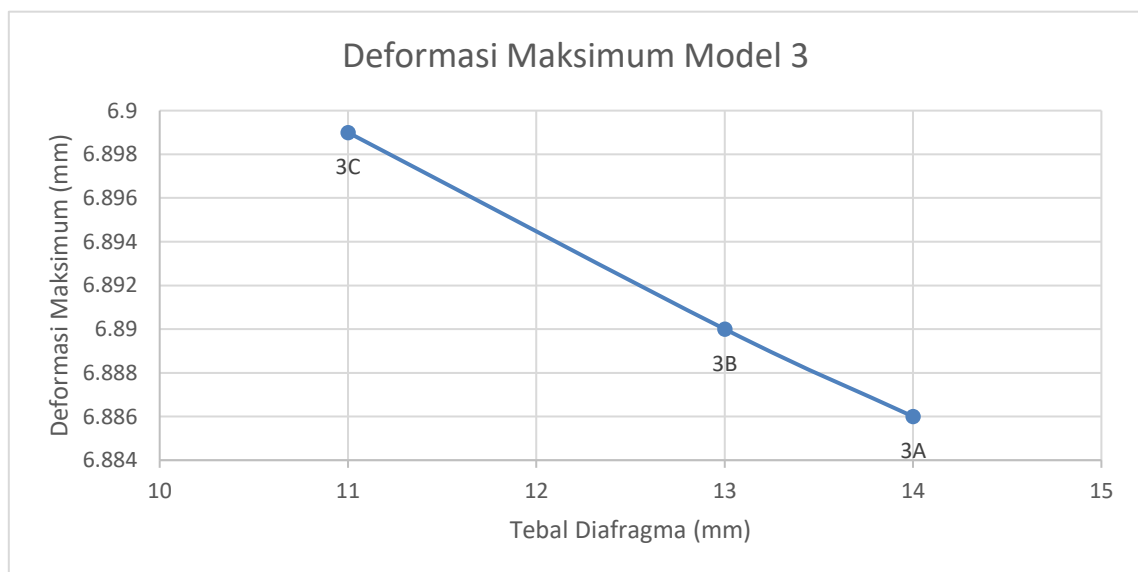
Tabel IV.3 menunjukkan nilai tegangan maksimum dan deformasi maksimum untuk setiap variasi tebal diafragma sekat pada Model 3 dengan tinggi *lower stool* 1790 mm. Nilai tegangan maksimum yang terjadi untuk setiap variasi tebal diafragma sekat tidak mengalami perubahan, dengan nilai 223 MPa. Pengaruh perubahan tebal diafragma terhadap tegangan maksimum yang terjadi pada model ditunjukkan pada Gambar IV.23. Untuk nilai deformasi maksimum terbesar terjadi pada tebal diafragma 11 mm, dengan nilai 6.889 mm, dan nilai terkecil pada tebal diafragma 14 mm, dengan nilai 6.886 mm. pengaruh perubahan tebal diafragma terhadap deformasi maksimum yang dialami model ditunjukkan pada Gambar IV.24.





Gambar IV.23 Grafik Tegangan Maksimum Pada Variasi Model 3

Gambar IV.23 menunjukkan pengaruh perubahan tebal diafragma terhadap tegangan maksimum yang terjadi pada Model 3. Pada ketebalan diafragma terkecil 11 mm, terjadi tegangan maksimum sebesar 223 MPa. Kemudian dengan penambahan ketebalan menjadi 13 mm, nilai tegangan maksimum tidak berubah yaitu sebesar 223 MPa. Kemudian tebal diafragma terus bertambah menjadi 14 mm, dan nilai tegangan maksimum tidak berubah yaitu 223 MPa. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pengurangan ketebalan diafragma sekat mencapai 20% dari data kapal sesungguhnya tidak mempengaruhi nilai tegangan maksimum yang terjadi pada Model 3 dengan tinggi *lower stool* 1790 mm.



Gambar IV.24 Grafik Deformasi Maksimum Pada Variasi Model 3

Gambar IV.24 menunjukkan pengaruh perubahan tebal diafragma pada nilai deformasi maksimum yang terjadi pada Model 3. Nilai deformasi maksimum terbesar terjadi pada tebal diafragma terkecil yaitu 11 mm. Dengan penambahan tebal diafragma sebesar 2 mm, menjadi 13 mm, nilai deformasi maksimum yang terjadi semakin berkurang. Nilai deformasi tersebut terus berkurang seiring dengan penambahan tebal diafragma sekat menjadi 14 mm, sehingga nilai deformasi maksimum terendah terjadi pada tebal diafragma 14 mm. Dapat dikatakan bahwa penambahan tebal diafragma sekat berpengaruh pada turunnya nilai deformasi maksimum yang terjadi pada Model 3.

#### IV.4. Perbandingan Tegangan Pada Variasi Tinggi *Lower Stool*

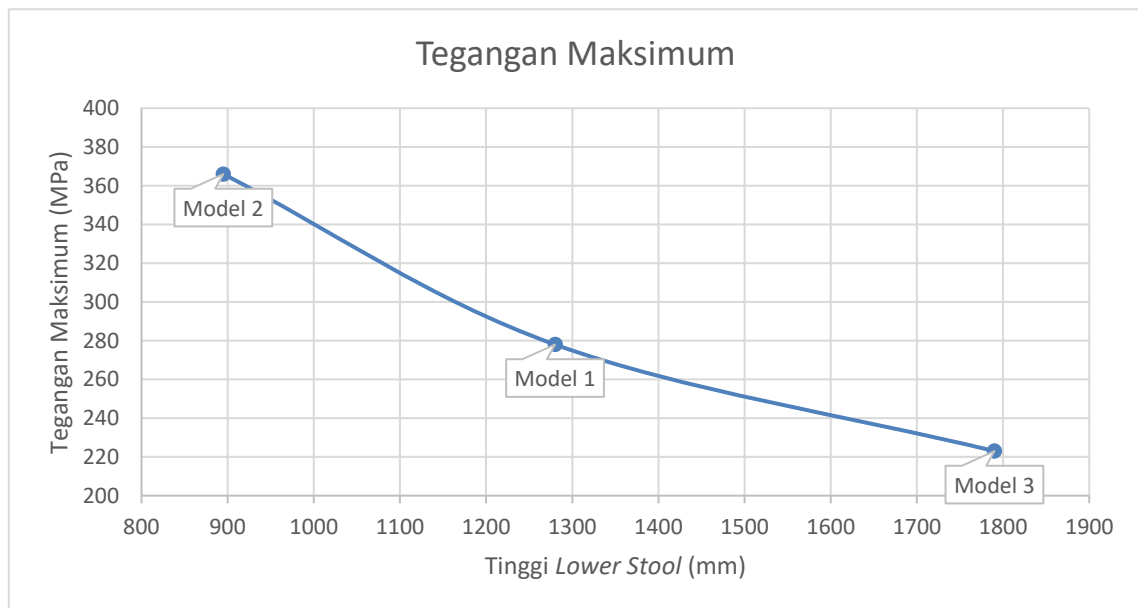
Berdasarkan hasil simulasi model sekat bergelombang, diperoleh nilai tegangan maksimum yang terjadi pada setiap variasi sekat bergelombang. Nilai tegangan maksimum pada model dapat dilihat pada Tabel IV.4.

Tabel IV.4 Nilai Tegangan Maksimum Pada Setiap Variasi Model

Model	Tinggi Stool (mm)	Tebal Diafragma (mm)	Tegangan Maksimum (MPa)
1A	1280	14	278
1B		13	278
1C		11	278
2A	895	14	366
2B		13	366
2C		11	367
3A	1790	14	223
3B		13	223
3C		11	223

Dapat dilihat dari Tabel IV.4 bahwa tegangan pada Model 3 memiliki nilai yang paling kecil dibandingkan dengan dua model lainnya. Hal tersebut disebabkan karena ketinggian *stool* pada Model 3 lebih tinggi dibandingkan Model 1 dan Model 2. Dan untuk nilai tegangan terbesar terjadi pada Model 2 dengan ketinggian *lower stool* 895 mm, pada model ini ketinggian *lower stool* merupakan variasi yang paling kecil dibandingkan dengan model

lainnya. Pengaruh perubahan tinggi *lower stool* terhadap nilai tegangan maksimum ditunjukkan pada Gambar IV.25.



Gambar IV.25 Grafik Perubahan Tegangan Maksimum Variasi Model Sekat Bergelombang Dengan Tebal Diafragma 14 mm

Dari hasil simulasi model, variasi ketinggian *lower stool* mempengaruhi tegangan maksimum yang terjadi pada konstruksi sekat bergelombang. Pengaruh perubahan tinggi *lower stool* terhadap tegangan maksimum sekat bergelombang dinyatakan pada Gambar IV.25. Terlihat bahwa nilai tegangan maksimum tertinggi pada Model 2 dengan tinggi *lower stool* 895 mm sebesar 366 MPa yang kemudian pada Model 1 dengan *lower stool* yang lebih tinggi; 1280 mm; terjadi penurunan tegangan maksimum menjadi 278 MPa, dimana selisih nilai tegangan maksimum tersebut sebesar 24.044% dari nilai tegangan maksimum pada Model 2. Nilai tegangan maksimum yang terjadi pada model sekat bergelombang semakin berkurang pada Model 3 seiring dengan penambahan ketinggian *lower stool* menjadi 1790 mm; yang merupakan variasi *lower stool* tertinggi; sebesar 19.784% sehingga nilai tegangan maksimum yang terjadi pada Model 3 sebesar 223 MPa.

Hasil simulasi model sesuai dengan yang dinyatakan dalam persamaan II.1 dan dijelaskan pada Sub-Bab II.2 yang menjelaskan bahwa seiring dengan perubahan tinggi ukuran *stool* yang semakin tinggi, maka besarnya beban yang dapat diterima oleh konstruksi sekat bergelombang akan menjadi semakin besar juga pada modulus sekat yang sama. Dengan demikian, kekuatan konstruksi sekat bertambah yang menyebabkan nilai tegangan berkurang.

Dari hasil perbandingan nilai tegangan maksimum dengan variasi perubahan tinggi *lower stool*, dapat disimpulkan bahwa Model 1 merupakan tinggi *lower stool* yang paling optimum. Hal tersebut disebabkan karena pada Model 1 dengan perbedaan ketinggian *lower stool* sebesar 385 mm dengan Model 2; dari 895 mm menjadi 1280 mm; memiliki penurunan nilai tegangan maksimum yang lebih besar dibandingkan dengan perbedaan ketinggian *lower stool* Model 1 dengan Model 3 yang sebesar 510 mm; dari 1280 mm menjadi 1790 mm. Hal tersebut juga diperkuat oleh dasar penentuan variasi yang dijelaskan pada Sub-Bab III.3, yang mana variasi ketinggian *lower stool* ditentukan berdasarkan jumlah penegar horizontal yang dipasang dalam konstruksi *lower stool*. Model 2; yang menggunakan satu penegar horizontal; dan Model 3; yang menggunakan tiga penegar horizontal; sama-sama memiliki selisih satu penegar horizontal dengan Model 1, dimana pada Model 1 menggunakan dua penegar horizontal.

#### IV.5. Perhitungan *Yield Utilisation Factor* Model Sekat Bergelombang

Berdasarkan Sub-Bab II.10, nilai tegangan maksimum dari sebuah model konstruksi tidak boleh melebihi kriteria yang diijinkan. Kriteria tegangan maksimum yang diijinkan dihitung dalam *yield utilisation factor* dari konstruksi tersebut. Dari hasil simulasi model, tegangan maksimum terjadi di daerah yang termasuk *fine mesh zone* sesuai dengan penjelasan pada Sub-Bab II.8.2, yaitu pada daerah sambungan antara sekat bergelombang dengan konstruksi *lower stool*. Untuk menentukan *yield utilisation factor* pada daerah yang termasuk *fine mesh zone* digunakan persamaan II.11 untuk setiap variasi konstruksi. Nilai *yield utilisation factor* yang diijinkan adalah  $\lambda_y \leq 1.2$ . Hasil perhitungan nilai *yield utilisation factor* dari setiap variasi model dapat dilihat pada Tabel IV.5.

Tabel IV.5 Perhitungan Nilai *Yield Utilisation Factor*

<i>Yield Utilisation Factor</i>	Model 1			Model 2			Model 3		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
Variasi Model	1.183	1.183	1.183	1.557	1.557	1.562	0.949	0.949	0.949
Ijin	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Status	√	√	√	X	X	X	√	√	√

\*keterangan      √ : memenuhi kriteria / *accepted*  
X : tidak memenuhi kriteria / *rejected*

Dari hasil perhitungan *yield utilisation factor* ditemukan bahwa Model 1 dan Model 3 memenuhi kriteria dengan tinggi *lower stool* 1280 mm dan 1790 mm. Variasi ketebalan pada kedua model tersebut tidak mempengaruhi nilai tegangan maksimum yang terjadi dan tidak berpengaruh pada perhitungan *yield utilisation factor* model sekat bergelombang. Oleh karena itu, semua variasi ketebalan pada Model 1 dan Model 3 memenuhi kriteria perhitungan.

Pada Model 2 dengan tinggi *lower stool* 895 mm, hasil perhitungan *yield utilisation factor* model sekat bergelombang tidak memenuhi kriteria. Dari hasil perhitungan didapatkan nilai *yield utilisation factor* sebesar 1.557 untuk tebal diafragma sekat 14 mm dan 13 mm, dan 1.562 untuk tebal diafragma sekat 11 mm. Nilai *yield utilisation factor* dari ketiga model tersebut lebih besar dibandingkan dengan kriteria yang diijinkan sehingga semua variasi ketebalan diafragma sekat untuk Model 2 tidak memenuhi kriteria perhitungan.

#### IV.6. Perbandingan Deformasi Pada Variasi Tinggi *Lower Stool* Model

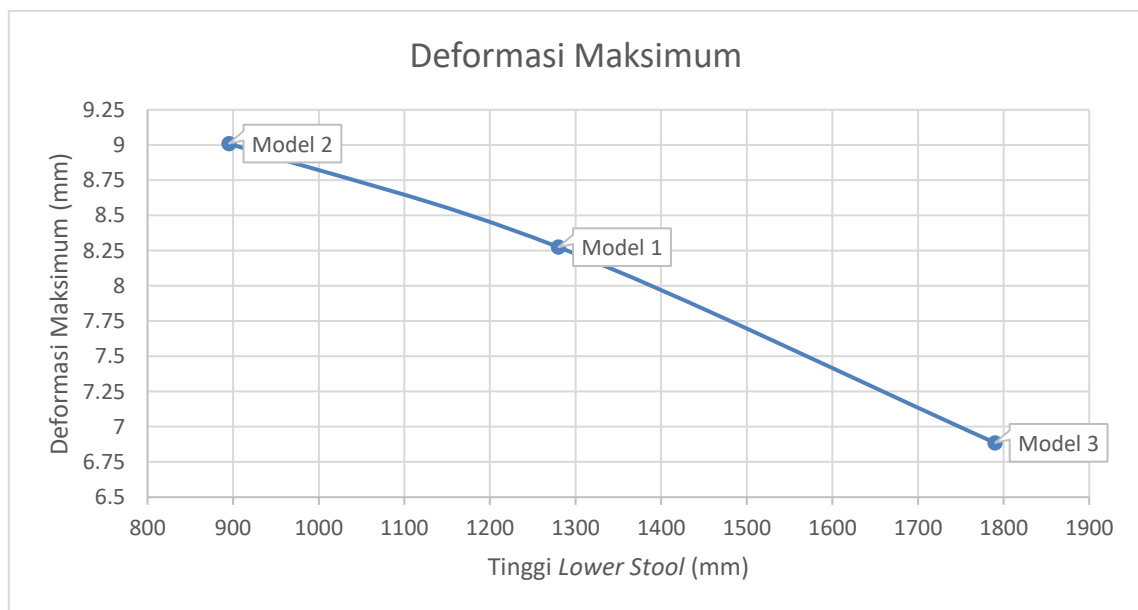
Pada analisis kekuatan sekat bergelombang, faktor deformasi konstruksi harus diperhatikan. Dari hasil simulasi model sekat bergelombang didapatkan nilai deformasi maksimum yang terjadi pada model sekat bergelombang. Nilai deformasi maksimum yang terjadi pada setiap variasi model sekat bergelombang dinyatakan pada Tabel IV.6.

Tabel IV.6 Nilai Deformasi Maksimum Setiap Variasi Model

Model	Tinggi Stool (mm)	Tebal Diafragma (mm)	Deformasi Maksimum (mm)
1A	1280	14	8.275
1B		13	8.278
1C		11	8.283
2A	895	14	9.010
2B		13	9.016
2C		11	9.029
3A	1790	14	6.886
3B		13	6.890
3C		11	6.899

Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan pada Tabel IV.6, nilai deformasi maksimum pada variasi ketinggian *lower stool* memiliki nilai yang berbeda-beda untuk setiap variasi tinggi. Nilai deformasi maksimum tertinggi terdapat pada Model 2 dengan tinggi *lower stool* 895 mm, yaitu sebesar 9.010 mm. Dan nilai deformasi maksimum paling rendah terdapat pada Model 3 dengan tinggi *lower stool* 1790 mm, yaitu sebesar 6.886 mm. Pengaruh perubahan ketinggian *lower stool* pada deformasi yang terjadi pada model sekat bergelombang ditunjukkan pada Gambar IV.26.

Dari proses simulasi model sekat bergelombang diperoleh hasil yang menunjukkan bahwa variasi ketinggian *lower stool* mempengaruhi deformasi maksimum yang terjadi pada sekat bergelombang, sesuai dengan yang ditunjukkan pada Gambar IV.26. Dapat dilihat bahwa tinggi *lower stool* yang semakin berkurang menyebabkan deformasi maksimum yang terjadi pada model sekat bergelombang akan bertambah besar. Deformasi maksimum terbesar terjadi pada Model 2 dengan variasi tinggi *lower stool* terkecil, yaitu 895 mm. Seiring dengan kenaikan tinggi *lower stool*, nilai deformasi pada model sekat bergelombang akan semakin rendah, seperti pada Model 1 dengan selisih tinggi *lower stool* sebesar 385 mm terjadi penurunan nilai deformasi maksimum sebesar 8.158% dari nilai deformasi maksimum yang terdapat pada Model 2; sebesar 9.010 mm. Sama seperti deformasi maksimum pada Model 3 juga mengalami penurunan sebesar 16.875% dari deformasi maksimum yang terjadi pada Model 1 dengan perbedaan ketinggian *lower stool* sebesar 510 mm.



Gambar IV.26 Grafik Perubahan Deformasi Maksimum Variasi Model Sekat Bergelombang Dengan Tebal Diafragma 14 mm

Dengan perbedaan penurunan nilai deformasi maksimum yang hampir 2 kali lipat, Model 3 dianggap sebagai variasi tinggi *lower stool* yang optimum dalam perbandingan nilai deformasi maksimum variasi model. Perubahan tinggi *lower stool* dari Model 2 menjadi Model 1 sebesar 385 mm hanya menghasilkan penurunan nilai deformasi maksimum sebesar 0.735 mm, sedangkan dengan penambahan tinggi *lower stool* dari Model 1 yang tidak mencapai 1.5 kali lipatnya; bertambah 510 mm; Model 3 dapat menyebabkan terjadinya penurunan nilai deformasi maksimum yang hampir mencapai 2 kali lipatnya, yaitu sebesar 1.389 mm.

#### IV.7. Perbandingan Berat Konstruksi Model

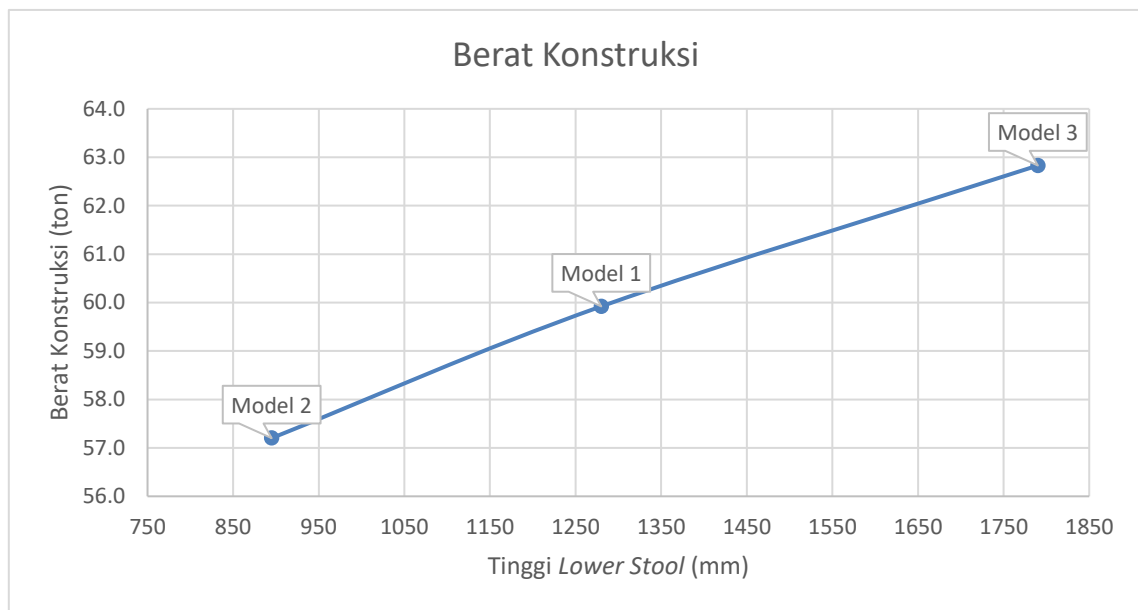
Berat konstruksi didapatkan melalui proses *solver* dalam pemodelan sekat bergelombang bersamaan dengan proses simulasi model. Berat konstruksi dihitung berdasarkan massa jenis dari material yang didefinisikan untuk elemen yang dibuat pada model sekat bergelombang. Dengan massa jenis baja *class II grade A* sebesar  $7850 \text{ kg/m}^3$ , diperoleh massa jenis untuk setiap variasi model sekat bergelombang seperti yang dinyatakan pada Tabel IV.7.

Tabel IV.7 Berat Konstruksi Setiap Variasi Model Sekat Bergelombang

Model	Tinggi Stool (mm)	Tebal Diafragma (mm)	Berat Konstruksi (ton)
1A	1280	14	59.921
1B		13	59.669
1C		11	59.167
2A	895	14	57.201
2B		13	56.939
2C		11	56.415
3A	1790	14	62.830
3B		13	62.589
3C		11	62.110

#### IV.7.1. Model Dengan Variasi Tinggi *Lower Stool*

Berat konstruksi untuk setiap variasi tinggi *lower stool* memiliki nilai yang berbeda-beda. Berat konstruksi terbesar terdapat pada Model 3 dengan tinggi *lower stool* sebesar 1790 mm, yaitu sebesar 62.830 ton. Nilai berat konstruksi terendah terdapat pada Model 2 dengan tinggi *lower stool* sebesar 895 mm, yaitu 57.201 ton. Pengaruh perubahan ketinggian *lower stool* terhadap berat konstruksi dari model sekat bergelombang dinyatakan pada Gambar IV.27.



Gambar IV.27 Grafik Perubahan Berat Konstruksi Variasi Model Sekat Bergelombang Dengan Tebal Diafragma 14 mm

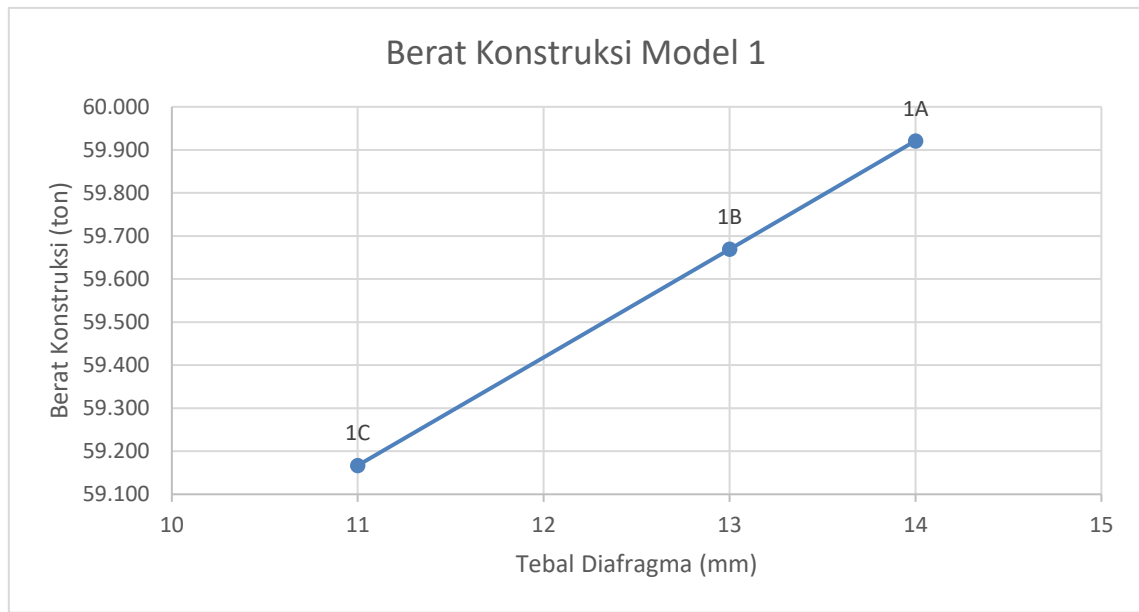
Dari hasil perhitungan berat konstruksi menunjukkan bahwa perubahan ketinggian *lower stool* yang semakin tinggi menyebabkan berat konstruksi dari model sekat bergelombang akan bertambah besar sesuai dengan yang ditunjukkan pada Gambar IV.27. Ditunjukkan bahwa berat konstruksi terbesar terdapat pada Model 3 dengan tinggi *lower stool* 1790 mm. Nilai berat konstruksi tersebut berkurang sebesar 2.909 ton pada Model 1 yang memiliki tinggi *lower stool* yang lebih rendah dengan selisih 510 mm. Pada Model 2 dengan selisih tinggi *lower stool* sebesar 385 mm lebih rendah dari Model 1, berat konstruksi model menjadi lebih rendah dari berat konstruksi Model 1, dengan pengurangan sebesar 2.720 ton.

#### IV.7.2. Model Dengan Variasi Tebal Diafragma Sekat

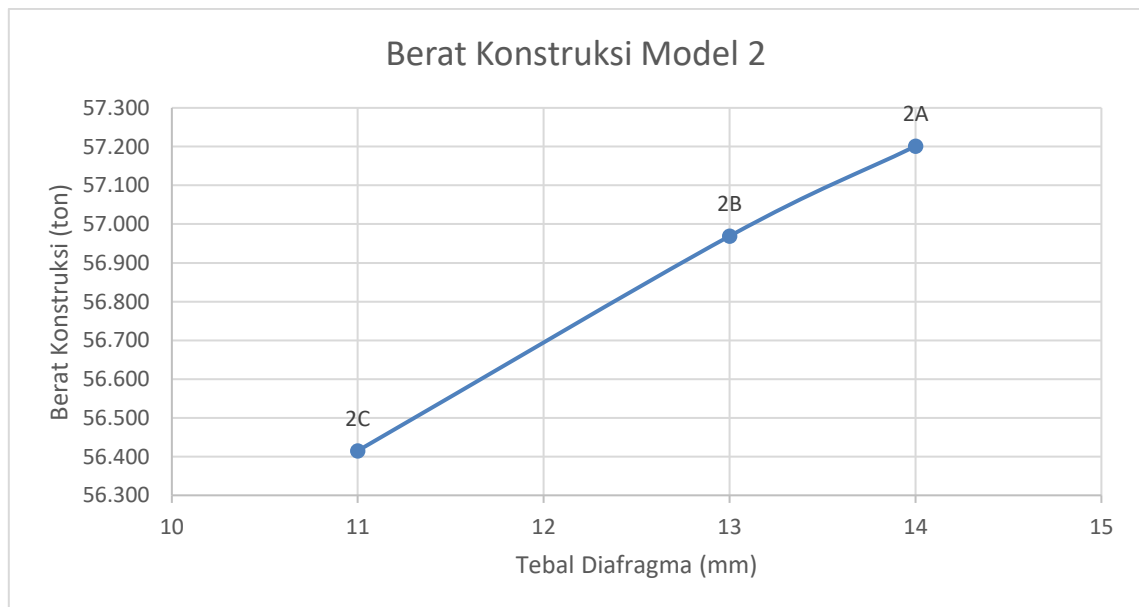
Hasil perhitungan berat konstruksi juga menunjukkan pengaruh perubahan ketebalan diafragma terhadap berat dari konstruksi sekat bergelombang. Perubahan berat konstruksi terhadap ketebalan diafragma dinyatakan pada Gambar IV.28 sampai Gambar IV.30.



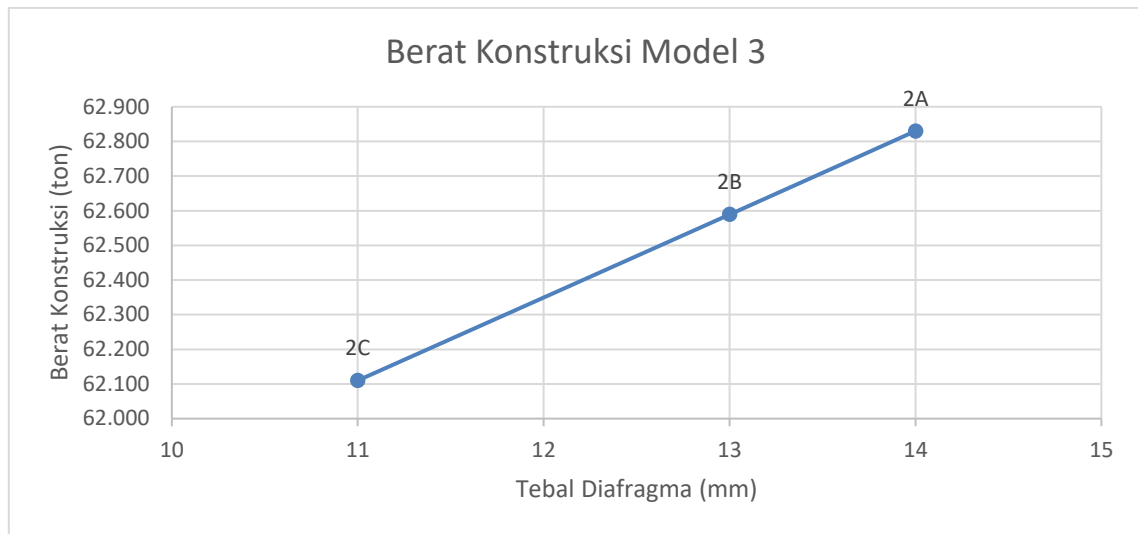
Perubahan ketebalan diafragma sekat pada setiap variasi model mempengaruhi berat konstruksi model sekat bergelombang. Seperti yang terlihat pada Gambar IV.28, berat konstruksi pada Model 1 mencapai nilai tertinggi pada ketebalan diafragma sekat 14 mm, dan berat konstruksi berkurang seiring dengan pengurangan ketebalan diafragma sekat sehingga nilai terendah pada ketebalan 11 mm.



Gambar IV.28 Grafik Nilai Berat Konstruksi Pada Variasi Model 1



Gambar IV.29 Grafik Nilai Berat Konstruksi Pada Variasi Model 2



Gambar IV.30 Grafik Nilai Berat Konstruksi Pada Variasi Model 3

#### IV.8. Perbandingan Pengurangan Volume Tangki Muat

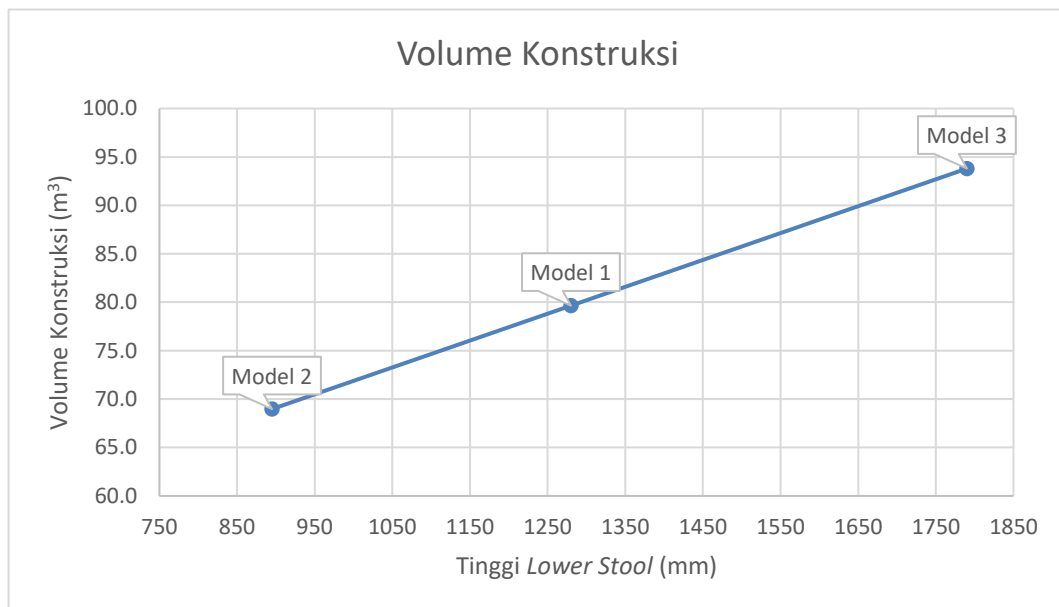
Pengurangan volume tangki muat akibat konstruksi model sekat bergelombang dihitung berdasarkan luasan penampungan *upper stool* dan *lower stool* yang terpasang pada model tersebut, sesuai yang dijelaskan pada Sub-Bab III.8. Hasil perhitungan pengurangan volume tangki muat ditunjukkan pada Tabel IV.8.

Tabel IV.8 Nilai Volume Konstruksi Setiap Variasi Model Sekat Bergelombang

Model	Tinggi Stool (mm)	Tebal Diafragma (mm)	Jumlah Diafragma	Volume Konstruksi (m <sup>3</sup> )
1A	1280	14	31	79.644
1B		13		79.612
1C		11		79.548
2A	895	14	32	68.965
2B		13		68.932
2C		11		68.865
3A	1790	14	30	93.795
3B		13		93.765
3C		11		93.703

#### IV.8.1. Model Dengan Variasi Tinggi *Lower Stool*

Dalam variasi tinggi *lower stool*, variasi model memiliki nilai volume konstruksi atau nilai volume tangki muat yang hilang akibat konstruksi model sekat bergelombang. Hal tersebut disebabkan karena salah satu faktor dalam perhitungan volume konstruksi adalah luasan penampang *lower stool*, yang dimana pada variasi tinggi *lower stool* yang semakin meningkat akan menyebabkan luasan penampang *lower stool* bertambah, seperti yang terlihat pada Gambar IV.31. Volume konstruksi terbesar terdapat pada Model 3 dengan nilai 93.765 m<sup>3</sup>, dengan tinggi *lower stool* 1790 mm. Nilai volume konstruksi berkurang pada Model 1 dan Model 2 yang memiliki tinggi *lower stool* yang lebih rendah, berurutan yaitu 79.644 m<sup>3</sup> dan 68.965 m<sup>3</sup>.



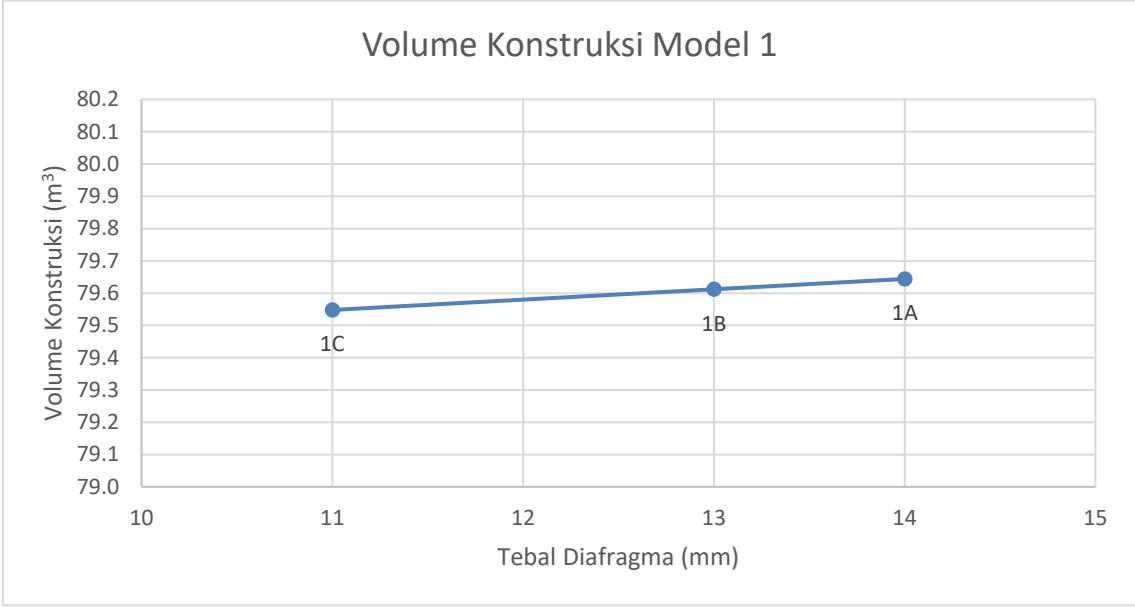
Gambar IV.31 Grafik Perubahan Volume Konstruksi Model Sekat Bergelombang Dengan Tebal Diafragma 14 mm

Nilai volume konstruksi berbanding lurus dengan perubahan ketinggian *lower stool* seperti yang terlihat pada Gambar IV.31. Semakin tinggi *lower stool* yang dipasang pada model, maka nilai volume konstruksi akan bertambah besar juga.

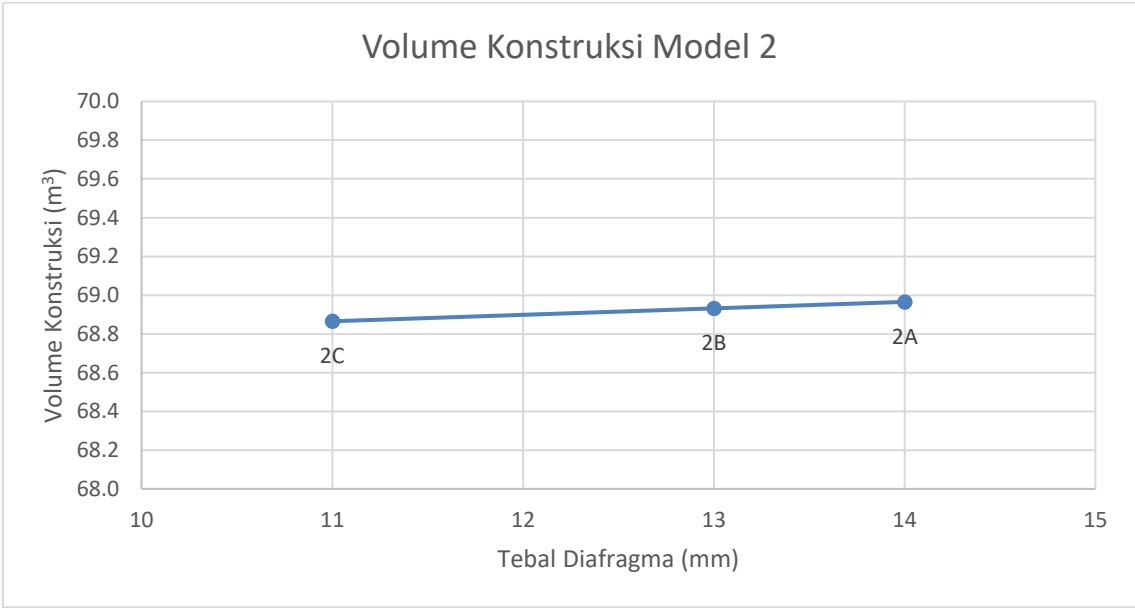
#### IV.8.2. Model Dengan Variasi Tebal Diafragma

Pada variasi ketebalan diafragma, pengaruh yang terjadi pada volume konstruksi tidak signifikan. Nilai volume konstruksi untuk setiap model dengan variasi tebal diafragma ditunjukkan pada Gambar IV.32 sampai Gambar IV.34. Volume konstruksi terbesar terdapat pada model dengan variasi tebal diafragma sekat 14 mm, dan terkecil pada tebal diafragma 11 mm. Pada Model 1 perubahan volume konstruksi akibat pengurangan tebal diafragma yaitu

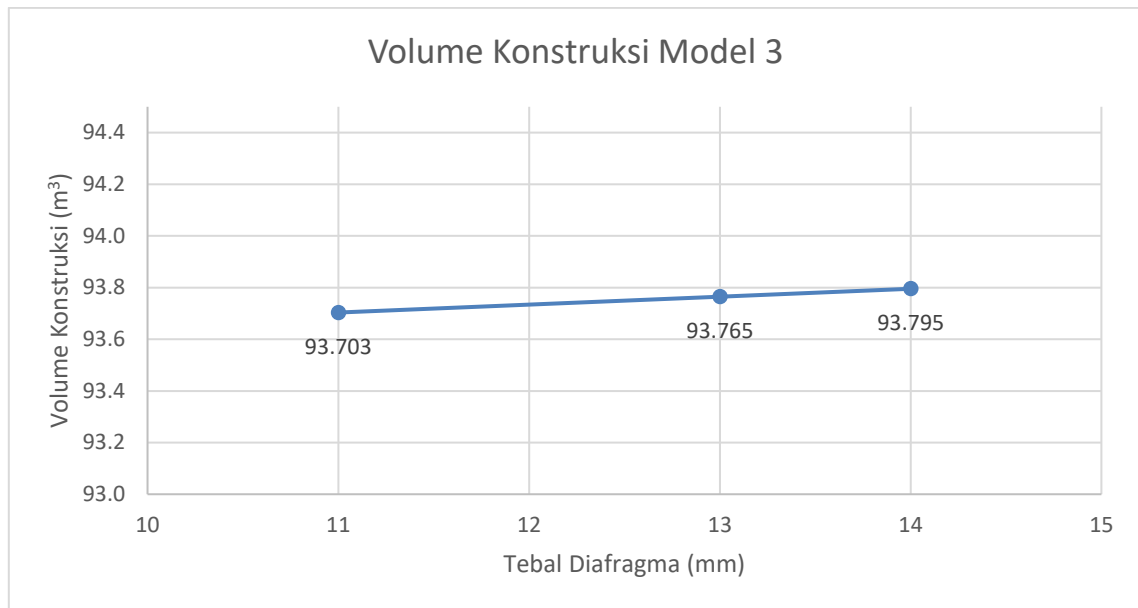
terjadi pengurangan sekitar 3.2% per mm pengurangan tebal dafragma, pada Model 2 pengurangan volume sekitar 3.3% per mm pengurangan tebal diafragma, dan pada model 3 pengurang volume sekitar 3.1% per mm pengurangan tebal diafragma.



Gambar IV.32 Nilai Volume Konstruksi Pada Variasi Model 1



Gambar IV.33 Nilai Volume Konstruksi Pada Variasi Model 2



Gambar IV.34 Nilai Volume Konstruksi Pada Variasi Model 3

#### IV.9. Pemilihan Model Yang Optimum

Dari 4 aspek yang dijelaskan sebelumnya, kemudian dilakukan pemilihan desain model sekat bergelombang yang optimum. Pemilihan desain model yang optimum dilakukan dengan dasar untuk meningkatkan efektivitas penggunaan sekat bergelombang. Dari 4 aspek tersebut, dijelaskan sebagai berikut:

##### 1. Aspek Tegangan Konstruksi

Dalam hal tegangan konstruksi, kriteria pemilihan desain dilakukan berdasarkan tegangan ijin yang diperbolehkan pada model, dalam hal ini nilai *yield utilisation factor* model tidak boleh melebihi nilai yang diijinkan. Berdasarkan Tabel IV.5 yang menyatakan nilai *yield utilisation factor* untuk setiap variasi model, didapatkan bahwa model yang memenuhi kriteria adalah Model 1 dan Model 3. Untuk Model 2 tidak memenuhi karena nilai *yield utilisation factor* model melebihi yang diijinkan sehingga untuk tahap selanjutnya Model 2 tidak masuk dalam analisis.

Pada variasi tebal diafragma, pengaruh tegangan maksimum yang terjadi terhadap perubahan tebal diafragma tidak memiliki nilai yang signifikan sehingga ketiga variasi ketebalan diafragma dapat dipilih dengan meninjau aspek-aspek lainnya.

## 2. Aspek Deformasi Konstruksi

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, terjadinya deformasi pada konstruksi merupakan hal yang merugikan sehingga nilai deformasi pada konstruksi dijaga agar seminimal mungkin. Dari hasil perbandingan antara dua variasi model; tanpa Model 2; didapatkan bahwa Model 3 memiliki nilai deformasi maksimum yang lebih kecil dibandingkan Model 1, dengan penurunan nilai deformasi sekitar 16% dari nilai deformasi maksimum pada Model 1.

Perubahan ketebalan diafragma juga berpengaruh pada nilai deformasi maksimum. Urutan variasi ketebalan diafragma dari variasi yang memiliki nilai deformasi maksimum terkecil, yaitu 14 mm; 13 mm; dan 11 mm.

## 3. Aspek Berat Konstruksi

Dari nilai berat konstruksi, variasi model yang dipilih adalah model dengan berat konstruksi yang minimal. Hal tersebut dikarenakan berat dari konstruksi sekat bergelombang dijaga sekecil mungkin agar tidak menambah berat kapal keseluruhan. Pada variasi tinggi *lower stool* berat konstruksi Model 1 lebih rendah daripada Model 3 dengan selisih sekitar 5 %.

Pada variasi tebal diafragma nilai berat konstruksi berbanding lurus dengan perubahan tebal diafragma sekat. Tebal diafragma sekat terkecil memiliki berat konstruksi yang terendah, dengan urutan ketebalan 11 mm; 13 mm; dan 14 mm.

## 4. Aspek Volume Konstruksi

Aspek volume konstruksi sama dengan berat konstruksi, yaitu diambil nilai seminimal mungkin karena pengurangan volume tangki muat akibat konstruksi sekat akan mempengaruhi efektivitas pemasangan sekat bergelombang. Dalam hal ini, Model 1 memiliki nilai volume konstruksi yang lebih rendah dibandingkan dengan Model 3, dengan selisih sekitar 17%.

Ketebalan diafragma tidak mempengaruhi volume konstruksi secara signifikan, tetapi masih terjadi penurunan nilai volume konstruksi seiring dengan pengurangan ketebalan diafragma sekat. Oleh karena itu, volume konstruksi terkecil terdapat pada variasi ketebalan terendah, yaitu 11 mm.

#### **IV.9.1. Variasi Tinggi *Lower Stool***

Dari kriteria yang dijelaskan sebelumnya, tinggi *lower stool* yang dianggap optimum adalah pada Model 1 dengan tinggi 1280 mm. Dari aspek tegangan, nilai *yield utilisation factor* Model 1 memenuhi kriteria. Pada aspek deformasi memang Model 3 lebih menguntungkan, tetapi pemilihan tinggi *lower stool* yang optimum harus dilihat juga pada aspek lainnya. Pada aspek berat dan volume konstruksi, pada Model 1 memiliki nilai yang lebih rendah daripada Model 3. Dengan demikian, konstruksi sekat bergelombang dengan tinggi *lower stool* 1280 mm merupakan ukuran yang optimum.

#### **IV.9.2. Variasi Tebal Diafragma Sekat**

Dari aspek tegangan konstruksi, variasi ketebalan tidak berpengaruh secara signifikan sehingga dapat diabaikan. Dari deformasi struktur, variasi tebal 14 mm lebih menguntungkan dibandingkan variasi ketebalan lainnya. Pada aspek berat dan volume konstruksi, variasi tebal 11 mm memiliki nilai yang lebih rendah daripada variasi ketebalan lainnya sehingga penggunaannya lebih menguntungkan. Dari penjelasan tersebut variasi tebal 11 mm memiliki poin keuntungan yang lebih banyak daripada variasi tebal 14 mm sehingga ukuran diafragma sekat dengan ketebalan 11 mm merupakan ukuran yang optimum.

Halaman ini sengaja dikosongkan



## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **V.1. Kesimpulan**

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan maka kesimpulan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Ukuran *lower stool* dan diafragma sekat yang optimum adalah variasi Model 1C dengan tinggi *lower stool* 1280 mm dan tebal diafragma sekat 11 mm yang memiliki nilai tegangan maksimum sebesar 278 MPa, nilai deformasi maksimum sebesar 8.283 mm, berat konstruksi 59.167 ton, dan volume konstruksi sebesar 79.548 m<sup>3</sup>;
2. Konstruksi sekat bergelombang yang memiliki nilai tegangan maksimum paling kecil terjadi pada tinggi *lower stool* 1790 mm dan nilai tegangan maksimum terbesar terjadi pada tinggi *lower stool* 895 mm, sedangkan untuk variasi ketebalan diafragma sekat tidak berpengaruh secara signifikan pada tegangan maksimum yang terjadi pada konstruksi sekat bergelombang;
3. Dengan perubahan ketinggian *lower stool* nilai deformasi sekat bergelombang terkecil terjadi pada variasi tinggi 1790 mm dan terbesar terjadi pada variasi tinggi 895 mm, sedangkan dengan perubahan ketebalan diafragma sekat nilai terkecil terjadi pada ketebalan 14 mm dan terbesar pada ketebalan 11 mm;
4. Berat konstruksi sekat bergelombang dipengaruhi oleh perubahan tinggi *lower stool* dengan nilai terbesar pada tinggi 1790 mm dan terkecil pada tinggi 895 mm, perubahan tebal diafragma sekat juga berpengaruh pada berat konstruksi dengan nilai berat konstruksi terbesar pada ketebalan 14 mm dan terkecil pada ketebalan 11 mm;
5. Konstruksi sekat bergelombang memiliki volume terbesar pada variasi tinggi *lower stool* 1790 mm dan terkecil pada tinggi 895 mm, pada variasi ketebalan diafragma nilai volume konstruksi terbesar terjadi pada ketebalan 14 mm dan terkecil pada ketebalan 11 mm.

## **V.2. Saran**

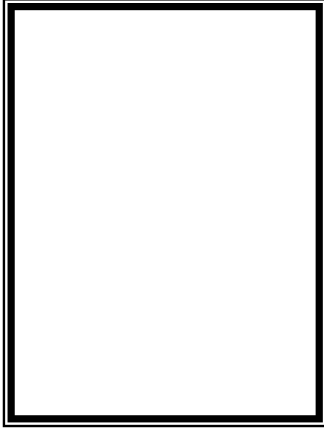
Saran yang diberikan untuk penelitian lebih lanjut adalah:

Permasalahan yang dibahas dalam Tugas Akhir ini sebatas pada pembebanan sekat bergelombang karena pembebanan normal. Untuk penelitian lebih lanjut dapat dilakukan analisis kekuatan pada sekat bergelombang akibat beban geser.

## DAFTAR PUSTAKA

- Eyres, D. J. (2001). *Ship Construction* (7th ed.). London: Butterworth-Heinemann.
- Hoque, K. N. (2016). *Thesis. Analysis of Structural Discontinues in Ship Hull Using Finite Element Methods*. Dhaka: Bangladesh University of Engineering And Technology.
- IHMC (Florida Institute for Human and Machine Cognition). (2013). *Bulkheads*. Florida: Florida Institute for Human and Machine Cognition.
- International Association of Classification Societies (IACS). (Consolidated Edition 2012). *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker (CSR)*. London: IACS Publishing.
- Konstantinos, S. (2015). *Diploma Thesis. Structural Design of Modern Chemical Tankers*. Metsovo, Greece: National Technical University of Athens.
- Logan, D. L. (2007). *A First Course in the Finite Element Method* (4th ed.). Toronto, Canada: Nelson.
- Okumoto, Y., Takeda, Y., Mano, M., & Okada, T. (2008). *Design of Ship Hull Structures: A Practical Guide for Engineers*. Tokyo: Springer.
- Rao, S. S. (2011). *The Finite Element Method in Engineering* (5th ed.). Burlington, Massachusetts: Elsevier.
- Stokoe, E. A. (1996). *Reed's Ship Construction for Marine Students* (5th ed.). Surrey, England: Thomas Reed Publications.
- Suga, H., Hayashi, T., Ishimaru, S., Hirano, K., & Ando, T. (2010). *Design Development of Corrugated Bulkhead*. Tokyo: Nippon Kaijin Kyokai (ClassNK).
- Weck, O. d., & Kim, I. Y. (2004). *Lecture Handout. Engineering Design and Rapid Prototyping: Finite Element Method*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.

## BIODATA PENULIS



Zaki Rabbani, adalah nama lengkap dari Penulis. Dilahirkan di Surabaya pada 26 Juni 1995 silam, Penulis merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara dalam keluarga. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar pada TK Al-Iman , kemudian melanjutkan ke SDN Kalisari I, SMPN 6 Surabaya dan SMAN 5 Surabaya. Setelah lulus SMA, Penulis diterima di Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS pada tahun 2013 melalui jalur SBMPTN.

Di Departemen Teknik Perkapalan Penulis mengambil Bidang Studi Rekayasa Perkapalan – Kontruksi dan Kekuatan Kapal. Selama masa studi di ITS, selain kuliah Penulis juga pernah menjadi *staff* Departemen Kewirausahaan HIMATEKPAL 2014/2015 serta *Steering Committee* HIMATEKPAL 2015/2016.

.

Email: zakirabbani10@gmail.com

## LAMPIRAN A PERHITUNGAN BEBAN LOKAL STATIS MUATAN

### 1. Beban *Cargo Tank*

#### a. Akibat Muatan Dalam Tangki Muat

Titik Pembebanan	I	II	III	Satuan
$z_{tk}$	0.00	9.37	10.65	m
$P_{in-tk}$	0.00	82.728	94.029	kN/m <sup>2</sup>

#### b. Akibat Air *Ballast* Dalam Tangki Muat

Titik Pembebanan	I	II	III	Satuan
$z_{tk}$	0.00	9.37	10.65	m
$P_{in-tk}$	0.00	94.218	107.088	kN/m <sup>2</sup>

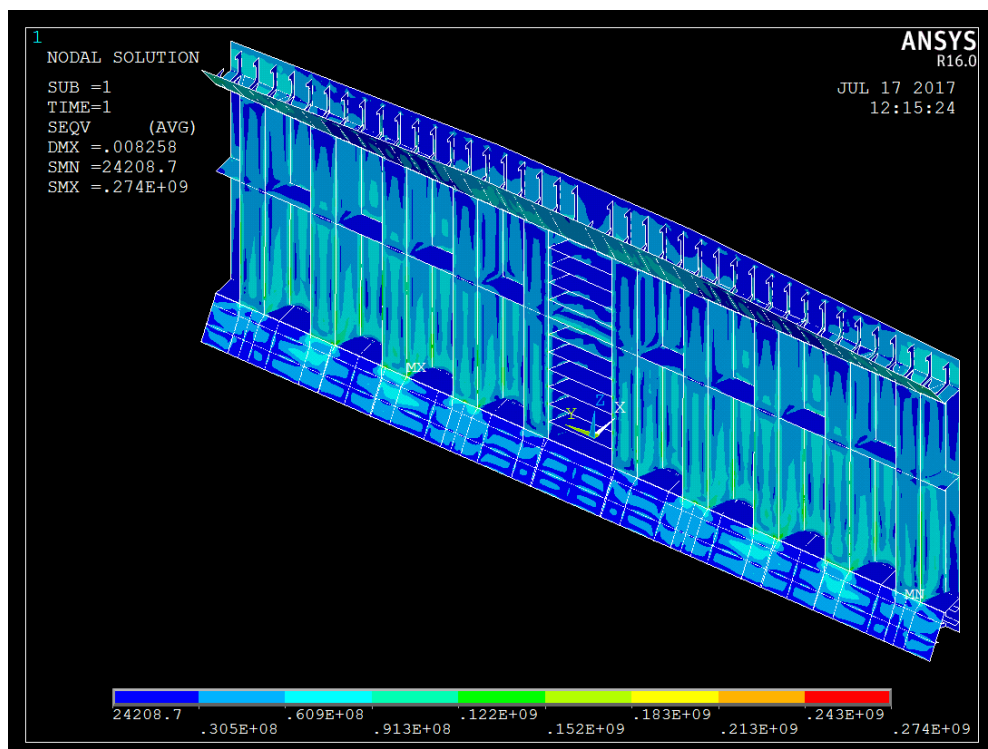
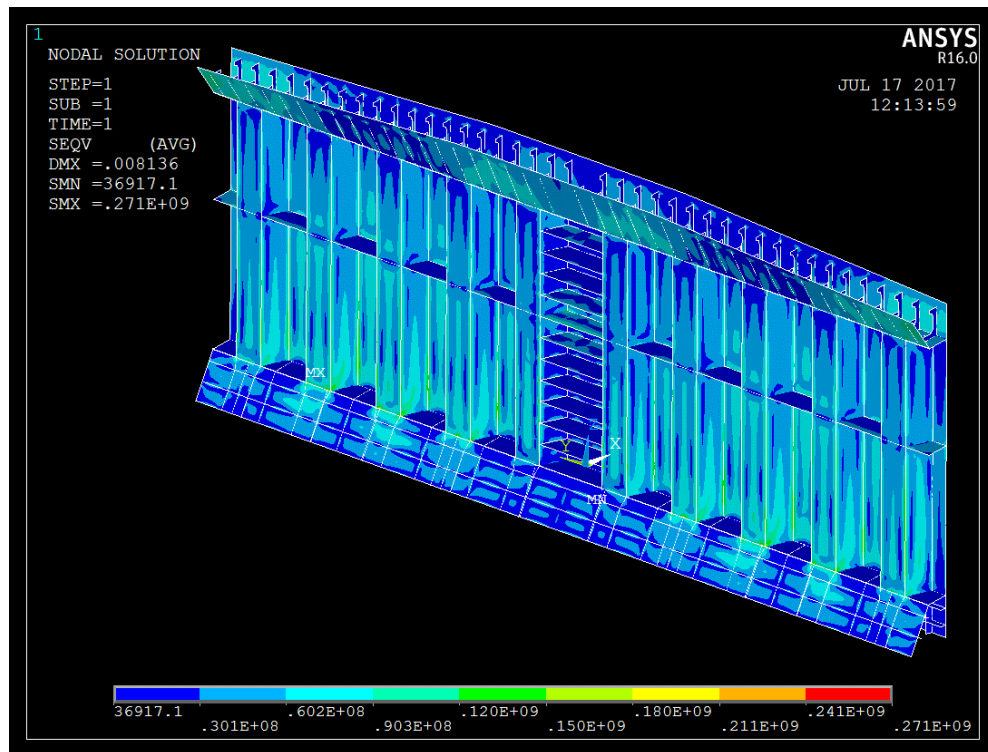
### 2. Beban Pengujian Tekanan

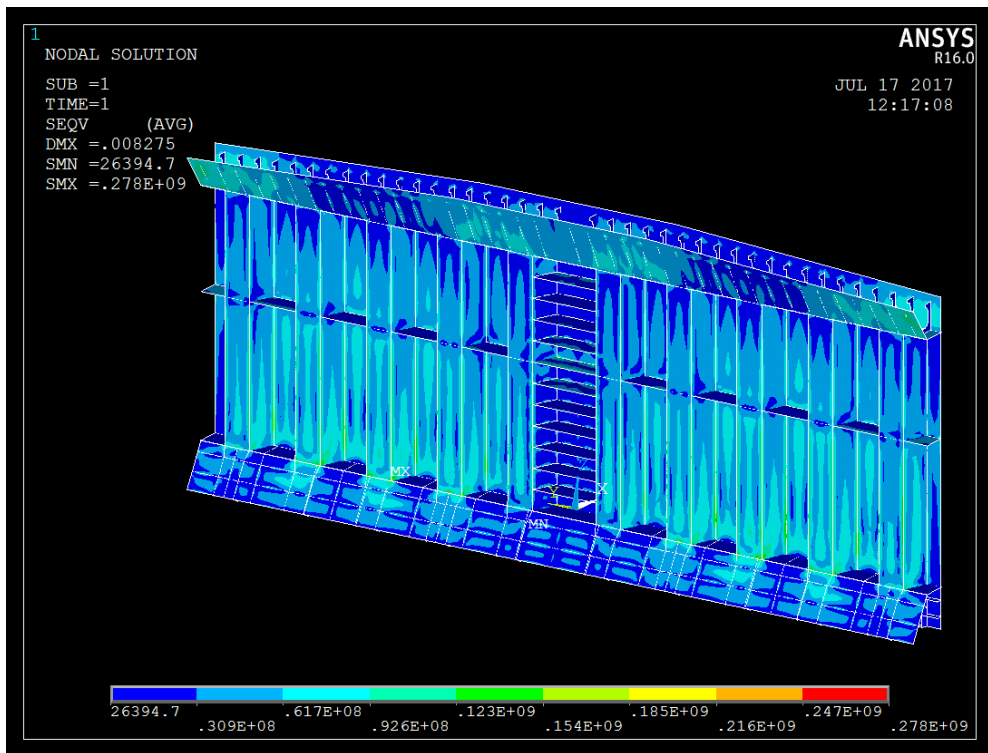
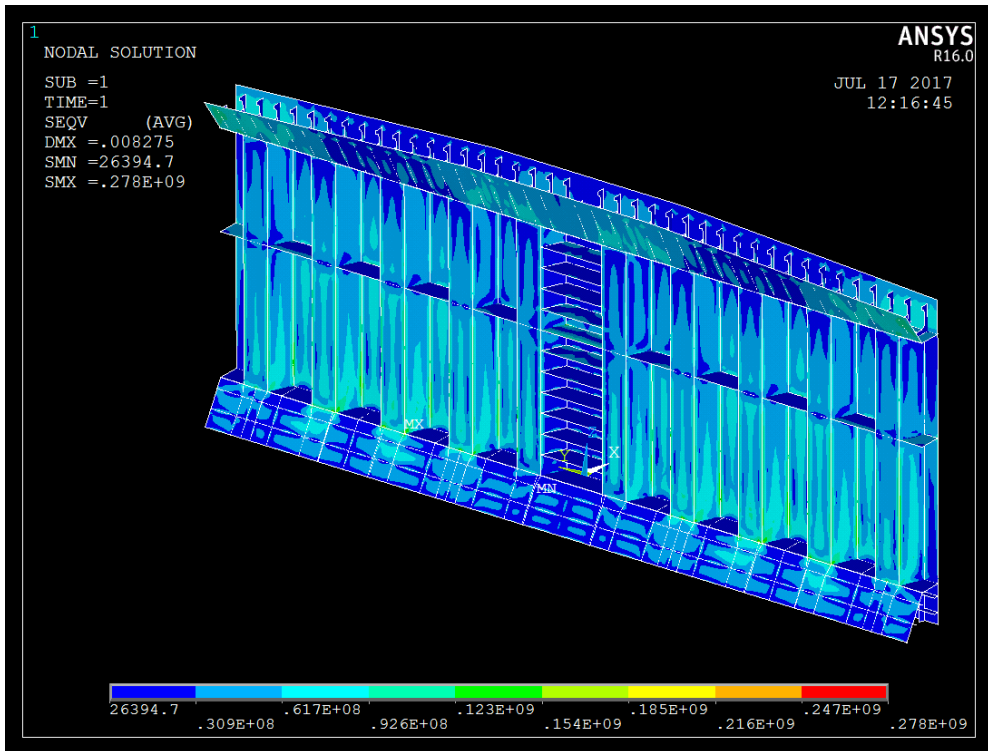
Titik Pembebanan	I	II	III	Satuan
$z_{test}$	2.4	11.77	13.05	m
$P_{in-test}$	24.133	118.350	131.221	kN/m <sup>2</sup>

Titik Pembebanan	I	II	III	Satuan
$z_{tk}$	0.00	9.37	10.65	m
$P_{in-test}$	25.00	119.218	132.088	kN/m <sup>2</sup>

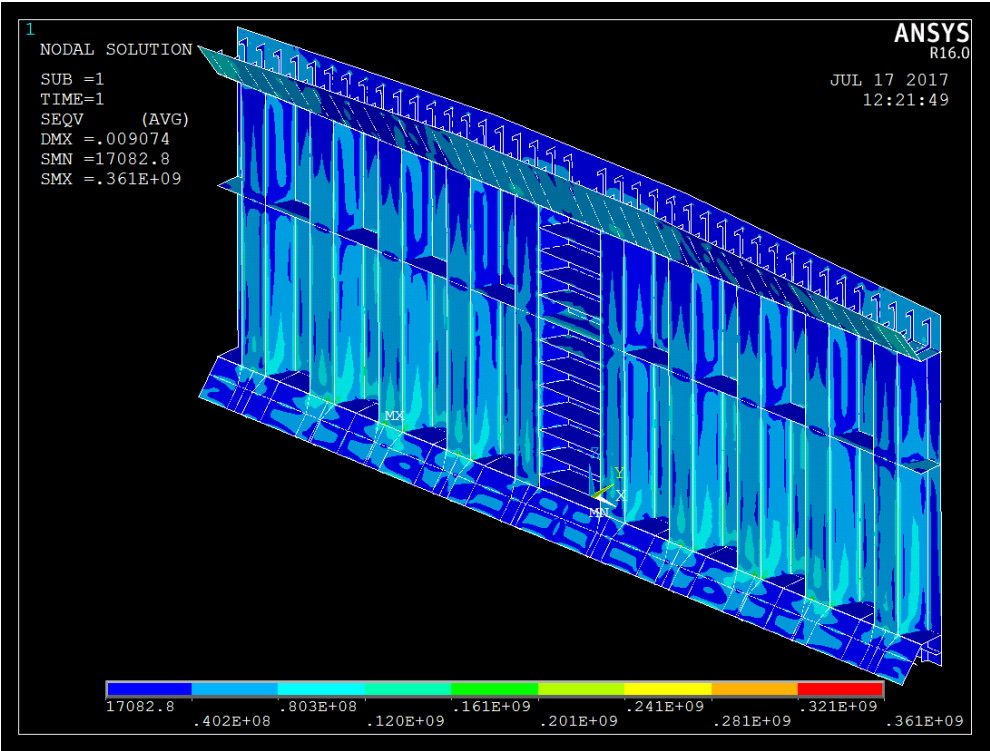
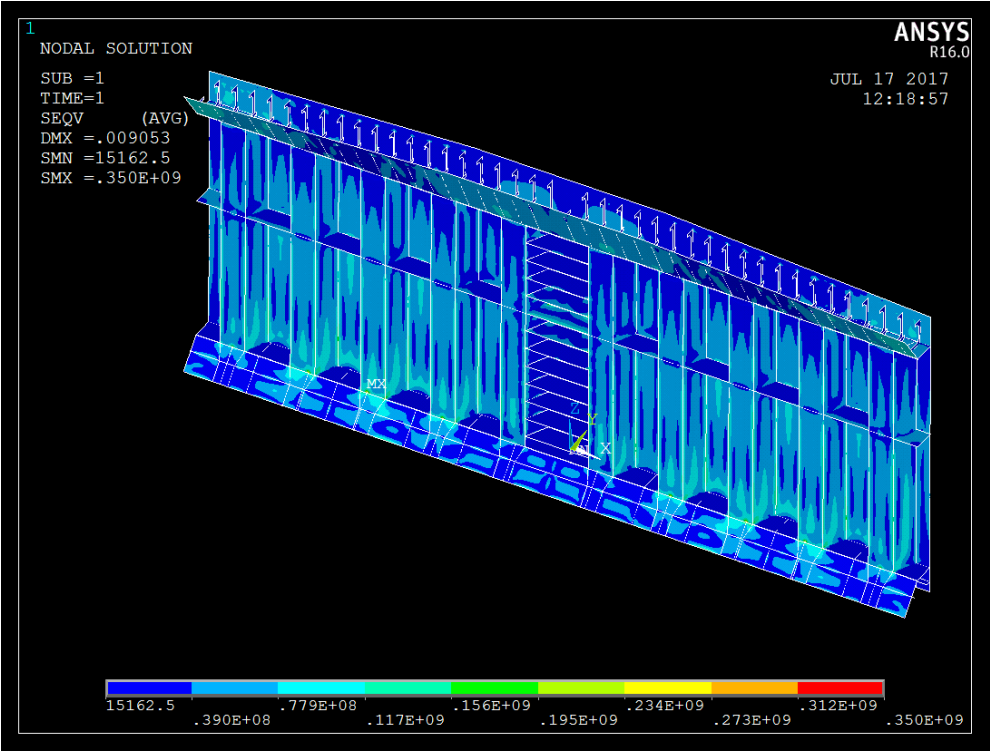
## LAMPIRAN B HASIL SIMULASI KONVERGENSI

### 1. Model 1A

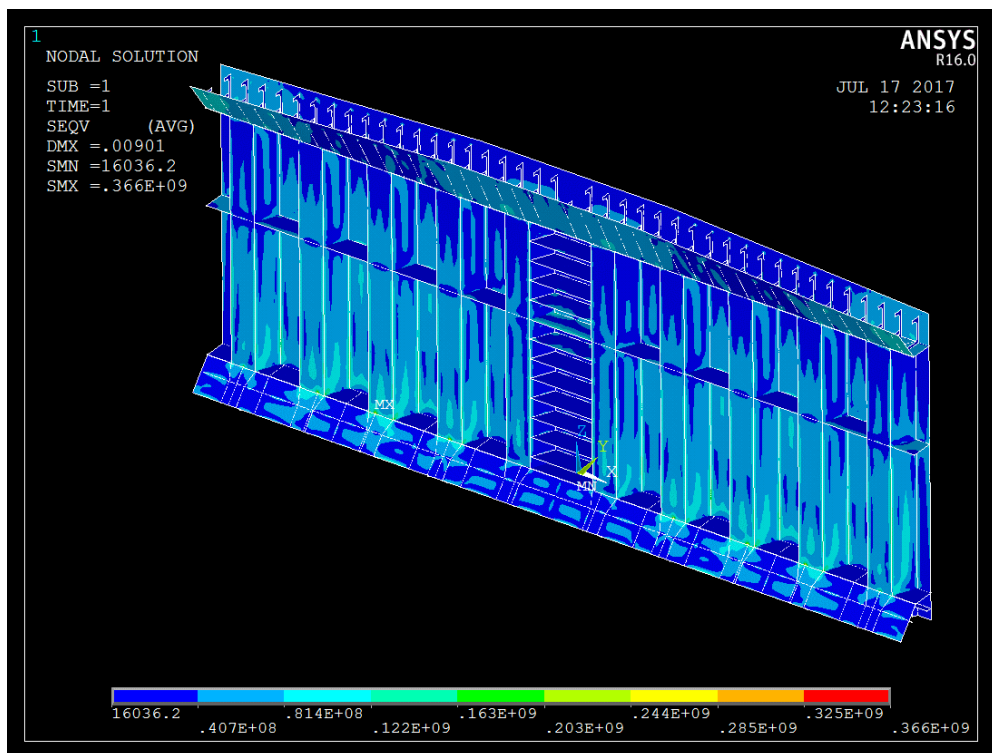
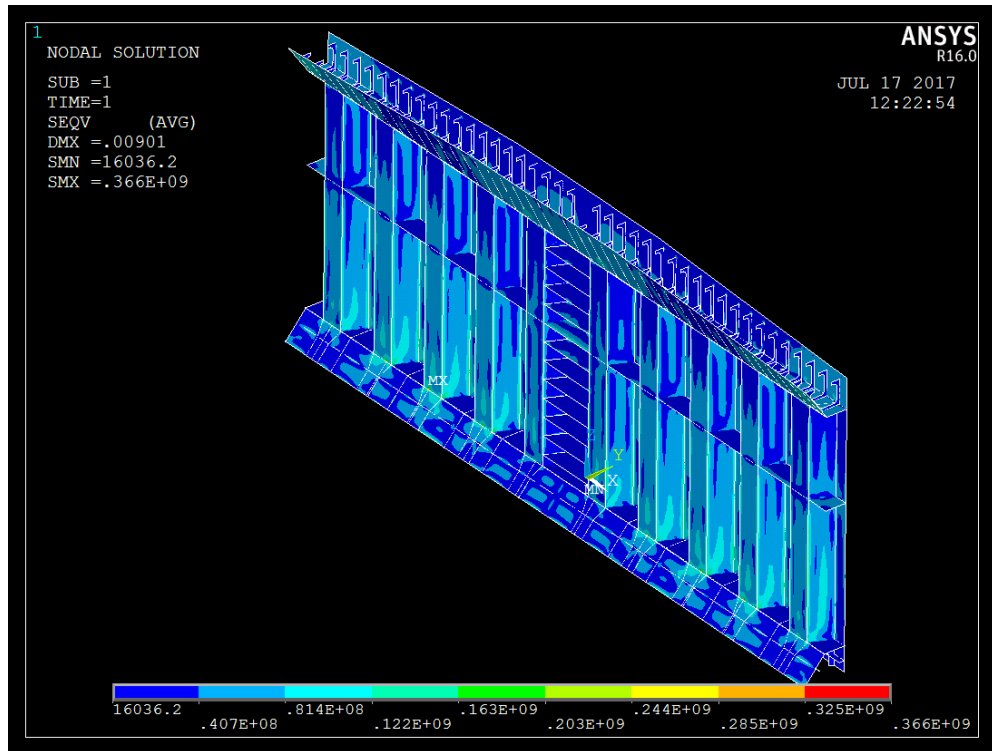




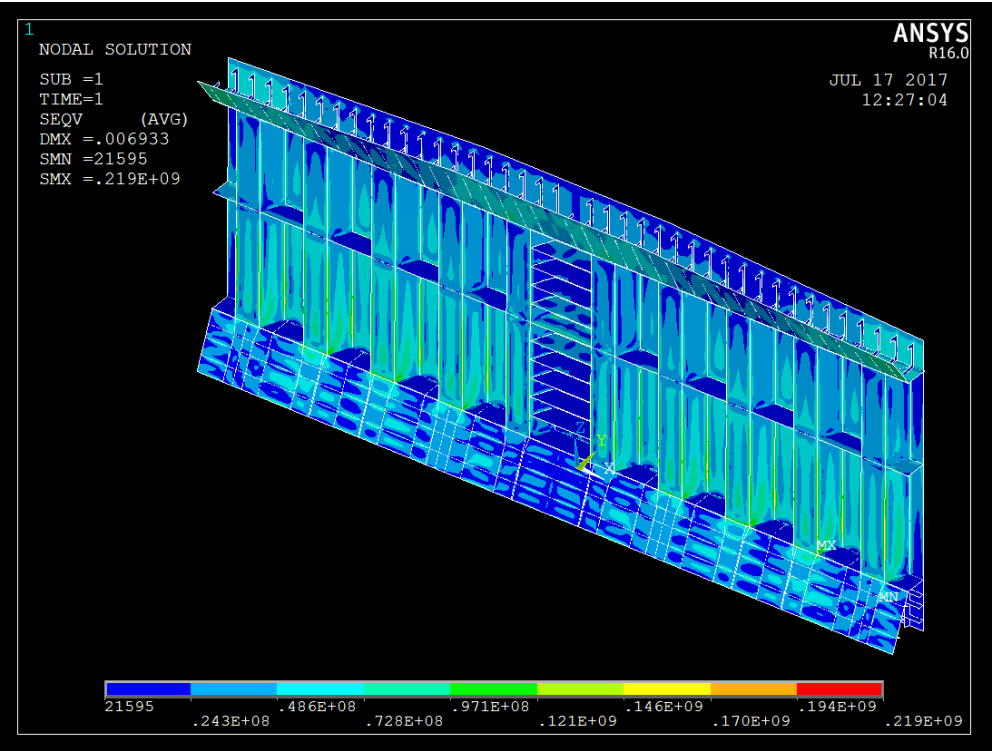
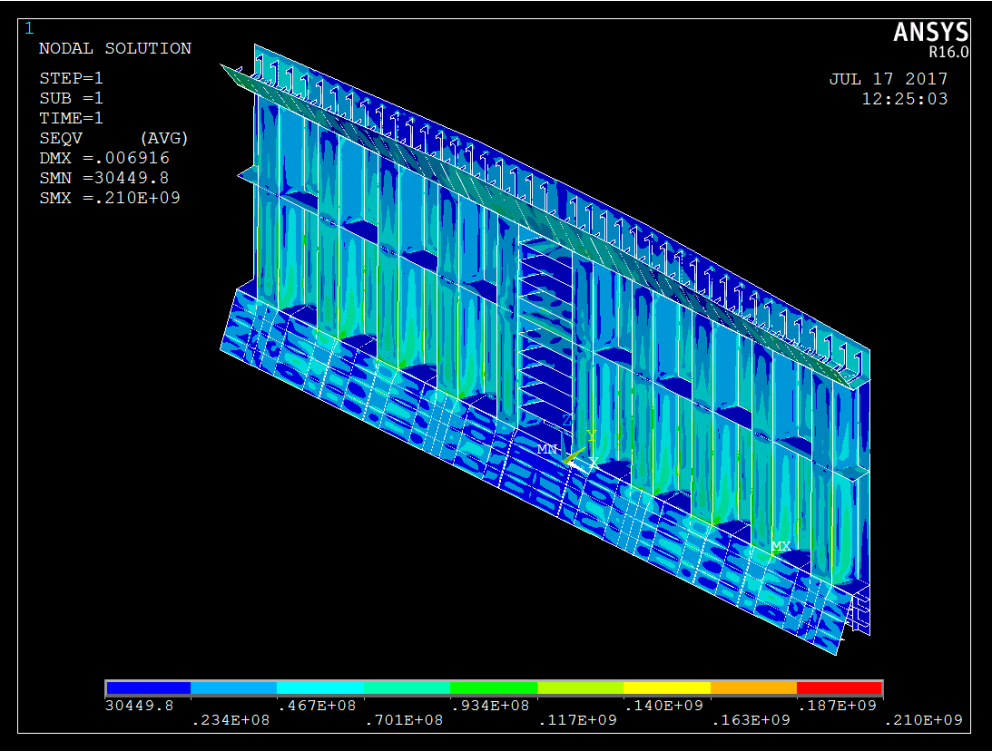
2. Model 2A

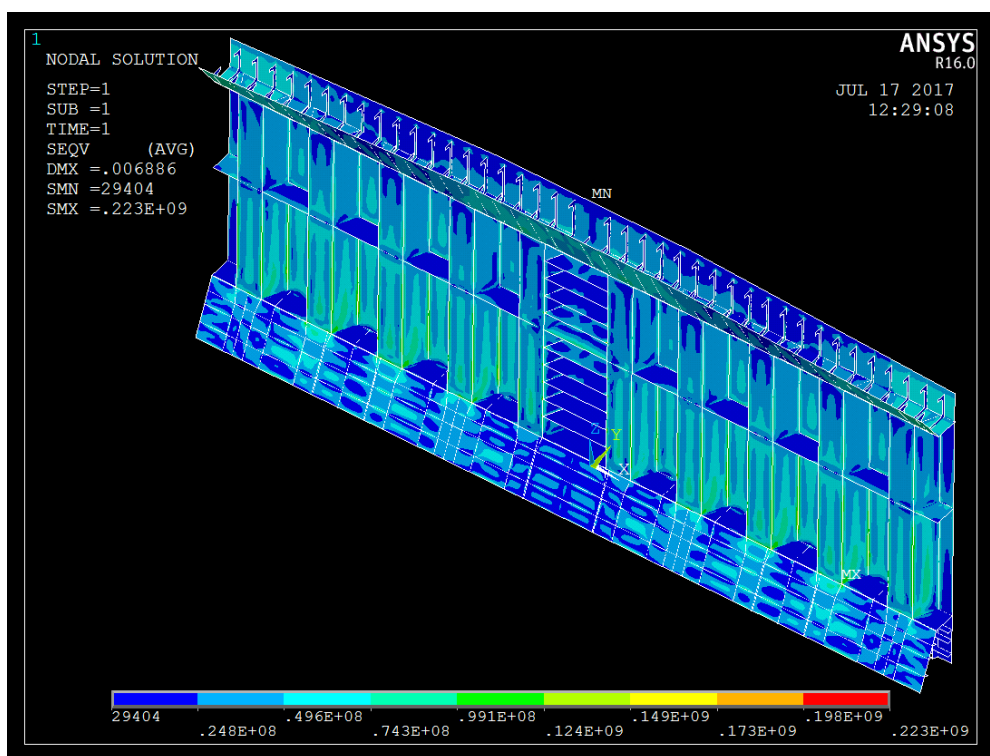
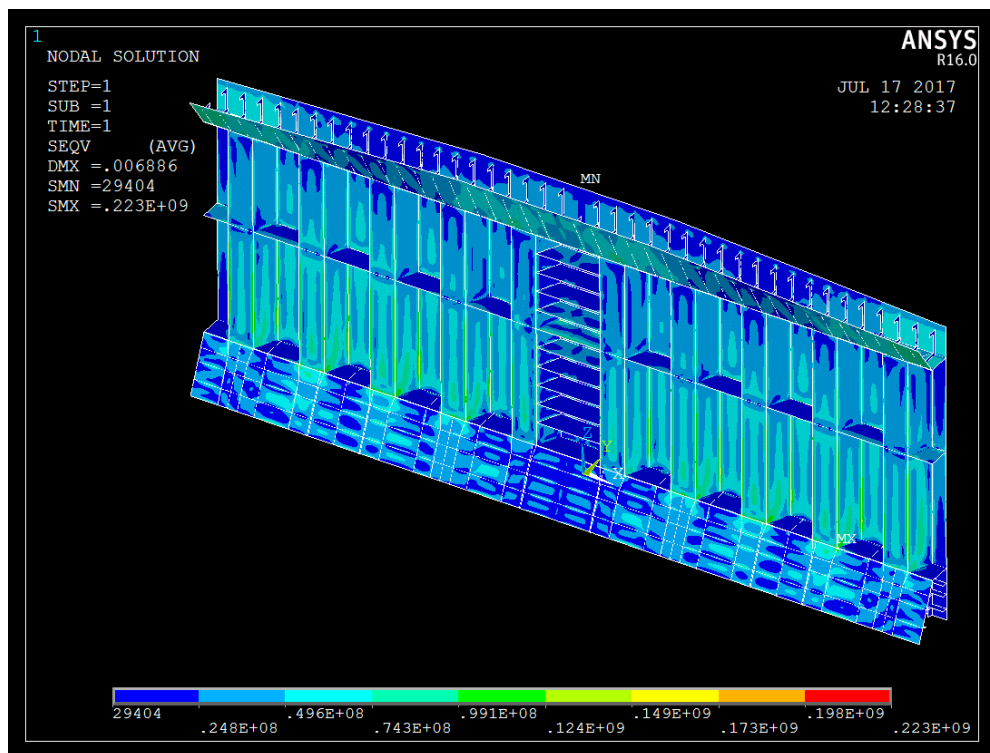






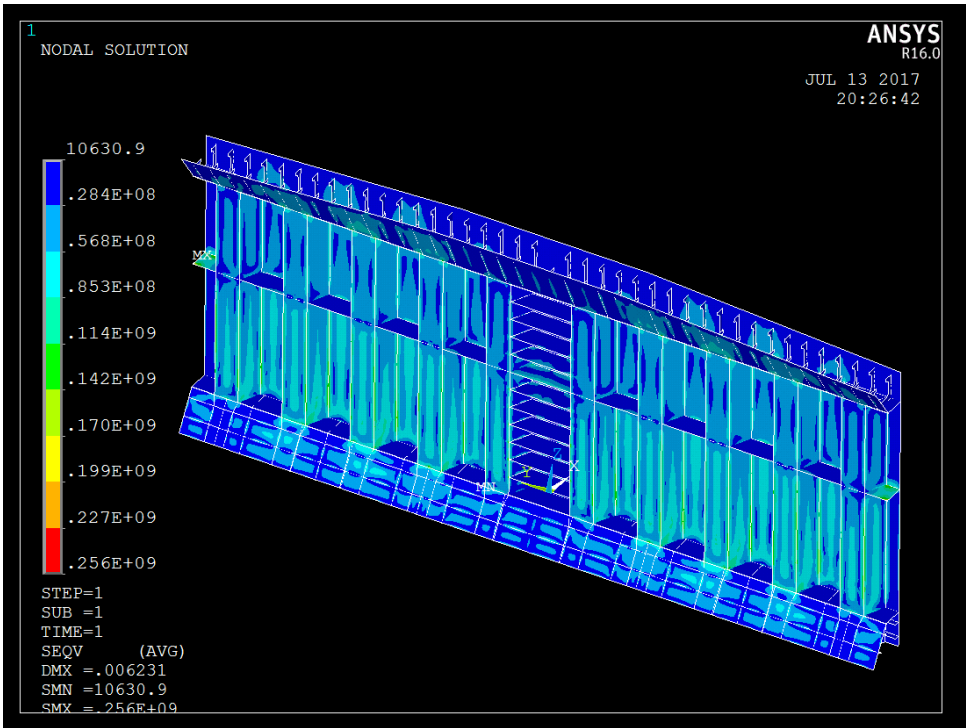
3. Model 3A



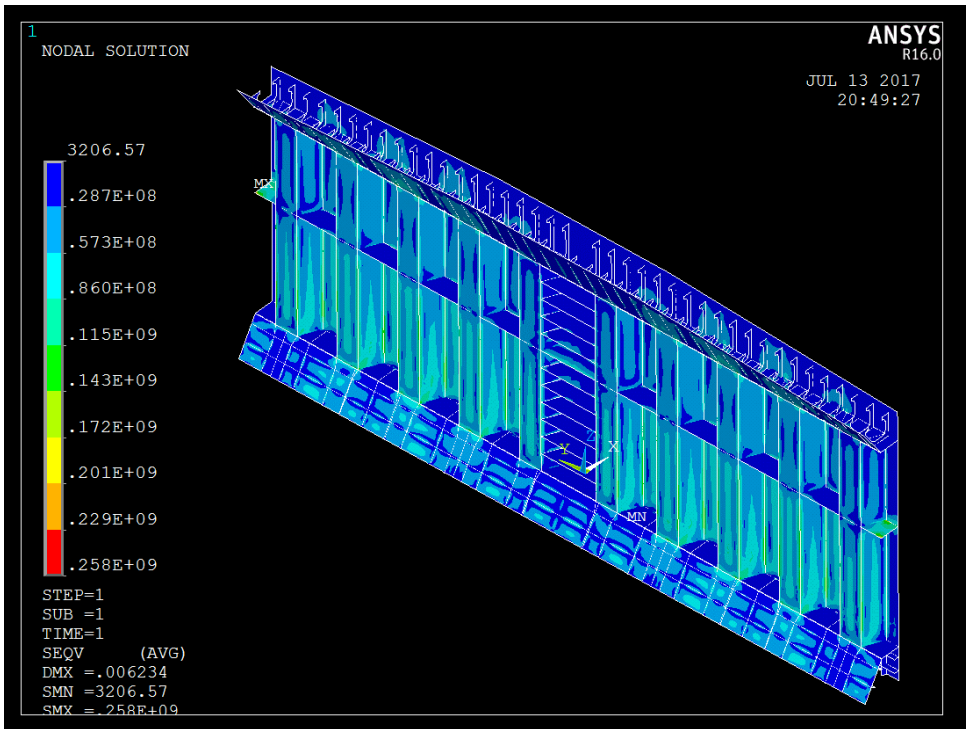


# LAMPIRAN C HASIL SIMULASI KONDISI BATAS

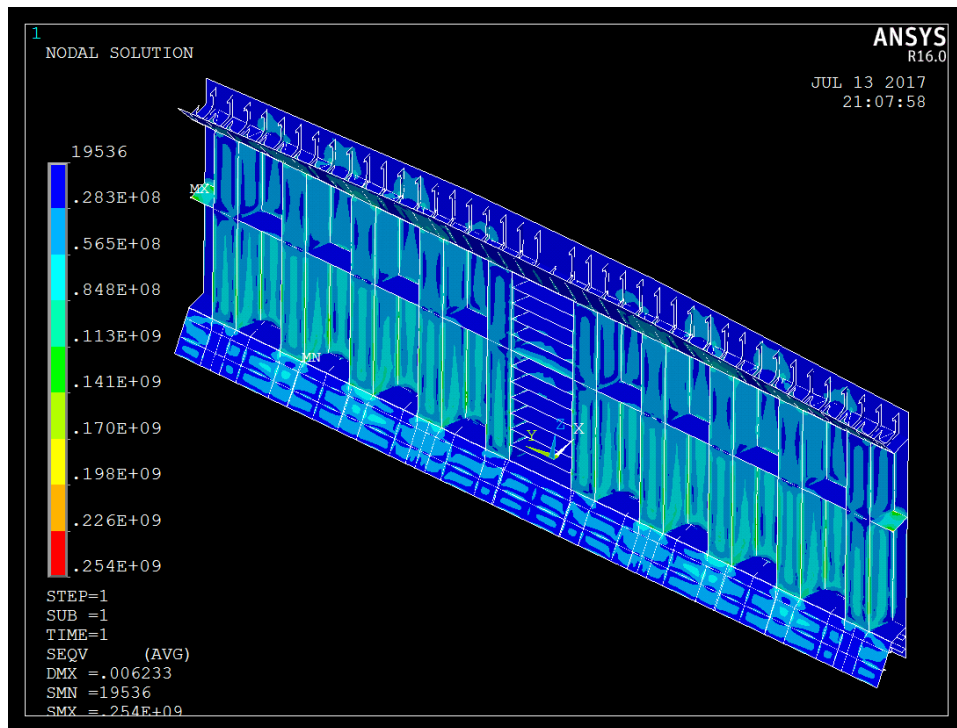
## 1. Variasi I



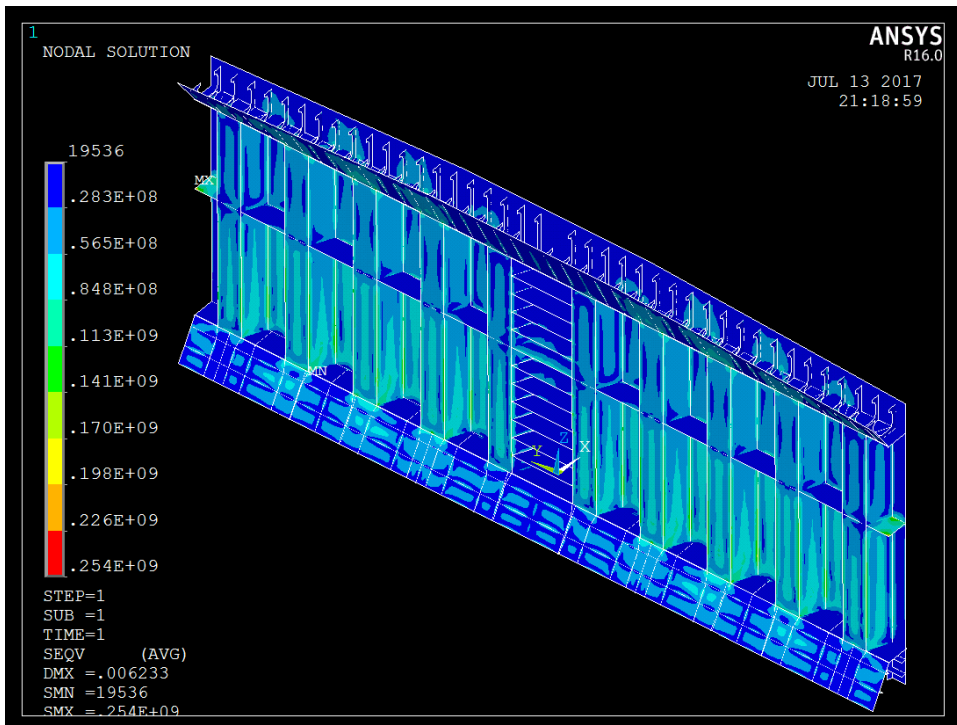
## 2. Variasi II



### 3. Variasi III

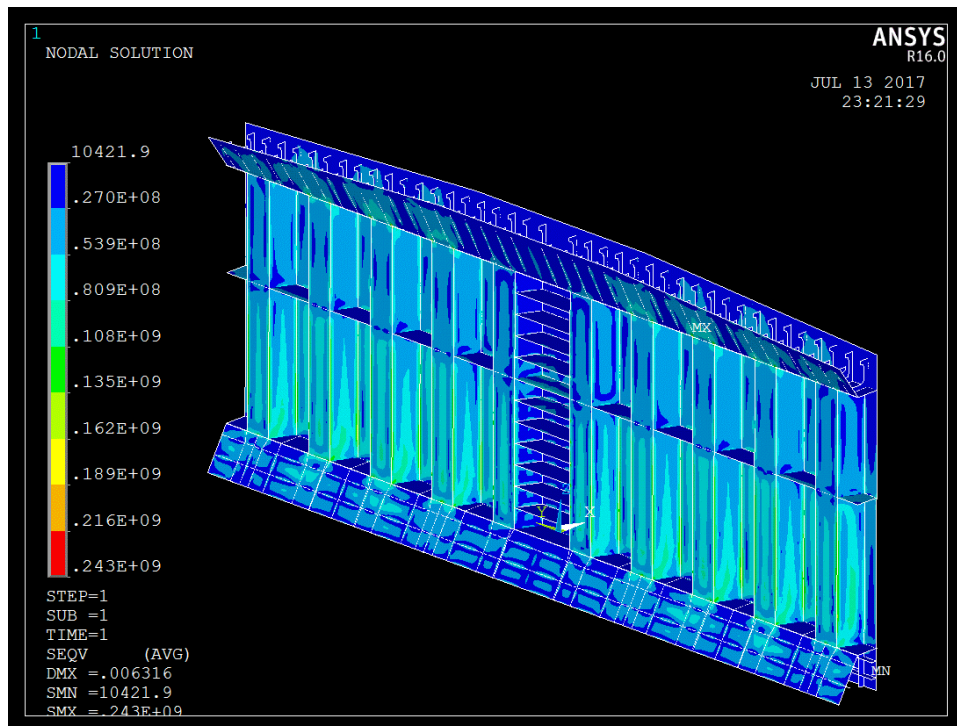


### 4. Variasi IV





## 5. Variasi V



## 6. Variasi VI

